

Marco Löwe

**Alternative Wirbelstrommesssystem-  
anordnungen zur axialen Lageerfassung  
einer magnetisch gelagerten Welle**

BAKKALAUREAT

HOCHSCHULE MITTWEIDA

---

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Elektro- und Informationstechnik

Mittweida, 2011

Marco Löwe

**Alternative Wirbelstrommesssystem-  
anordnungen zur axialen Lageerfassung  
einer magnetisch gelagerten Welle**

eingereicht als

**BAKKALAUREAT**

an der

**HOCHSCHULE MITTWEIDA**

---

**UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES**

Fakultät Elektro- und Informationstechnik

Chemnitz, 2011

Erstprüfer: Prof. Dr. Ing. Lutz Rauchfuß

Zweitprüfer: Prof. Dr. sc. techn. Dr. h. c. Peter-Klaus Budig

Vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am: 08.04.2011

**Aktuelle Zielsetzung der Abschlussarbeit (Bakkalaureat Marco Löwe)****Alternative Wirbelstrommesssystemanordnungen zur axialen Lageerfassung einer magnetisch gelagerten Welle**

Zur aktiven magnetischen Lagerung einer Welle ist es notwendig die Lage der Welle zu erfassen. Dies geschieht für alle zu regelnden Achsen: je x- und y-Richtung in den beiden Radiallagerebenen und in der axialen Richtung. Zur Lage-Istwerterfassung werden vor allem kapazitive, induktive, optische und Wirbelstromverfahren genutzt.

In einem gegenwärtigen betrieblichen Projekt wurde ein Magnetlagersystem entwickelt, indem der Rotor reibungsfrei im Vakuum betrieben wird. Um dies zu ermöglichen ist es notwendig die Welle gekapselt von den Magnetlagern in einer Hülse schweben zu lassen. Da diese Hülse undurchsichtig ist, ist die Verwendung eines optischen Wegmesssystems nicht möglich. Ein kapazitives Messverfahren scheidet aufgrund der schwer beherrschbaren Temperaturdrifts im Dielektrikum für die Lageerfassung aus. Das verbleibende Wirbelstromverfahren ist aufgrund bisheriger guter Erfahrungen weiter zu untersuchen, wobei ein rein induktives Messsystem in dieser Abschlussarbeit nicht zu erarbeiten ist.

Die axiale Lageerfassung erfolgt mit Wirbelstromsensoren in der Regel an der Stirnfläche der Welle. Da diese Stirnfläche im genannten speziellen Magnetlagersystem konstruktionsbedingt nicht zur Verfügung steht müssen alternative Messsystemanordnungen mit Wirbelstromsensoren entwickelt und untersucht werden, um die Lageerfassung weiterhin zu ermöglichen.

Die untersuchten / entwickelten Prinzipien sind auf ihre Anwendbarkeit für Magnetlager zu prüfen und zu bewerten. Dabei wird das Bakkalaureat folgende Meilensteine aufweisen:

- Theorie:
  - Wirbelströme allgemein (Entstehung, Ursache, Wirkung)
  - Wirbelstromsensor (Aufbau, Funktionsweise)
  - Wirbelstromsensor an einer Kante und Schräge in Abhängigkeit vom Winkel

- Praktische Versuche
  - Untersuchung des Messsignals an einer Kante
  - Untersuchung des Messsignals an einer Schräge in Abhängigkeit vom Winkel
  - Untersuchung des Messsignals an der Modellwelle mit Kante und 2 Schrägen entsprechend dem Anwendungsfall
  - Untersuchung des Messsignals an der Modellwelle bei unterschiedlicher Drehzahl
- Entwicklung einer Schaltung zur Auswertung der Messsignale entsprechend der Sensoranordnung und Übergabe der Signale an den analog Regler (Messauswertungsplatine)
- Technische Erprobung der Sensoranordnung mit Messauswertungsplatine
- Ausblick

Zur technischen Erprobung steht eine magnetisch gelagerte Welle in offener Bauform zur Verfügung.

**Hochschulbetreuer / Erstprüfer:**

Prof. Dr. Ing. Lutz Rauchfuß

  
 .....  
 (Unterschrift)

**Zweitprüfer:**

Prof. Dr.sc.techn. Dr.h.c. Peter-Klaus Budig

  
 .....  
 (Unterschrift)

**Student:**

Marco Löwe

  
 .....  
 (Unterschrift)

## Bibliographische Beschreibung:

Löwe, Marco:

Alternative Wirbelstrommesssystemanordnungen zur axialen Lageerfassung einer magnetisch gelagerten Welle. - 2011. - 59 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Informationstechnik & Elektrotechnik, Bakkalaureat, 2011

## Referat:

Mit dem vorliegenden Bakkalaureat soll eine alternative Messsystemanordnung mit Wirbelstromsensoren entwickelt und untersucht werden, um die axiale Lageerfassung einer magnetisch gelagerten Welle weiterhin zu ermöglichen, wenn eine herkömmliche axiale Lagemessung konstruktionsbedingt nicht mehr möglich ist. Dabei sind die zu untersuchenden Prinzipien hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für Magnetlager zu prüfen und zu bewerten. Diese Arbeit gibt zunächst einen Überblick über die Möglichkeiten der axialen Lageerfassung bei Magnetlagern im herkömmlichen Sinne und erläutert diese kurz in Funktion, Aufbau und Eigenschaften. Dabei wird das verwendete Wirbelstromverfahren in einem darauffolgenden eigenem Kapitel vertieft. Anschließend werden die möglichen alternativen Anordnungen zusammen mit den messtechnischen Untersuchungen aufgezeigt und bewertet. In einem weiteren Kapitel wird sich mit der praktischen Umsetzung bzw. mit der Messsystemauswertung der ausgewählten alternativen Wirbelstromsensoranordnung befasst. Im letzten Kapitel befindet sich die Zusammenfassung der Arbeit mit einem Ausblick für weitere Entwicklungs- und Einsatzideen.

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Bakkalaureuskandidatstätigkeit in der Firma EAAT GmbH Chemnitz (Elektrische Automatisierungs- und Antriebstechnik GmbH).

Ich möchte mich bei dem Geschäftsführer, Herrn Prof. Dr. sc. techn. Dr. h. c. Peter-Klaus Budig für die außerordentlich interessante Aufgabenstellung und seine Unterstützung bedanken.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr. Ing. Lutz Rauchfuß von der Hochschule Mittweida für seine Unterstützung und die Betreuung dieser Arbeit.

Außerdem gilt mein Dank Herrn Paditz als betrieblicher Betreuer sowie Herrn Pilz für ihre Unterstützung und den Mitarbeitern der Werkstatt bei EAAT für ihre Hilfe bei der Lösung praktischer Probleme.

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis .....	V
Formelzeichenverzeichnis.....	VI
Abkürzungsverzeichnis .....	IX
1. Einleitung.....	1
2. Wegmesssysteme für magnetisch gelagerte Wellen.....	2
2.1 Anforderungen.....	2
2.2 Optisches Wegmesssystem .....	3
2.3 Kapazitives Wegmesssystem .....	5
2.4 Induktives Wegmesssystem .....	8
3. Wirbelstrommesssystem.....	10
3.1 Wirbelstrom allgemein.....	10
3.1.1 Wirbelfeld .....	10
3.1.2 Durchflutungssatz und Induktionsgesetz.....	12
3.1.3 Wirbelstrom und seine Anwendungen.....	14
3.2 Wirbelstromsensoren .....	17
4. Alternative Messsystemanordnungen.....	22
4.1 Vorbetrachtungen .....	22
4.2 Messuntersuchungen .....	24
4.2.1 Messanordnung Kante im Vergleich zur schiefen Ebene .....	24
4.2.2 Schiefe Ebene in Abhängigkeit vom Winkel .....	28
4.2.3 Modellwelle mit Konus bei unterschiedlicher Drehzahl .....	31
4.3 Gründe der Nichtlinearität.....	32

Selbständigkeitserklärung..... 59



## Abbildungsverzeichnis

Bild 1-1: Aufbau einer magnetisch gelagerten Welle [1, S.25] .....	1
Bild 2-1: Blockschaltbild eines optischen Wegmesssystems [1, S.21] .....	3
Bild 2-2: konstruktiver Aufbau des optischen Wegmesssystems [1, S.21].....	4
Bild 2-3: radiales kapazitives Messprinzip [1, S.19] .....	5
Bild 2-4: axiales kapazitives Messprinzip [1, S.19] .....	6
Bild 2-5: Querschnitt eines radialen Sensorringes [1, S.20] .....	7
Bild 2-6: Funktionsprinzip induktiver Sensor mit Übertragungskurve .....	8
Bild 2-7: prinzipieller Aufbau eines induktiven Wegmesssystem [1, S.15] .....	9
Bild 3-1: stromdurchflossener Leiter .....	11
Bild 3-2: Wirkungen der Ruheinduktion.....	14
Bild 3-3: Prinzip der Wirbelstrombremse.....	15
Bild 3-4: a) Strom- und b) Feldverdrängung (Skinneffekt) .....	17
Bild 3-5: Simulationsmodell Wirbelstromsensor .....	18
Bild 3-6: prinzipieller Aufbau eines Wirbelstrommesssystems [1, S.17].....	19
Bild 4-1: schematische Problemdarstellung.....	23
Bild 4-2: Skizze der Konstruktionsproblematik.....	24
Bild 4-3: Versuchsaufbau und Startposition der Messreihe Kante .....	25
Bild 4-4: prinzipieller Aufbau der Messreihe 10° .....	26
Bild 4-5: Signalverlauf der Messreihen Kante und schiefer Ebene .....	27
Bild 4-6: prozentuale Abweichung von der Sollwertgeraden.....	27
Bild 4-7: Signalverläufe in Abhängigkeit vom Winkel .....	29
Bild 4-8: relative Abweichung in Winkelabhängigkeit.....	29
Bild 4-9: Messreihe Konus 9,5° bei unterschiedlicher Drehzahl .....	31
Bild 4-10: relative Abweichung der Messreihe Konus 9,5° .....	32
Bild 4-11: simulierte normale Abstandsmessung .....	33

Bild 4-12: simulierte Abstandsmessung bei einer Schräge von 10° .....	34
Bild 4-13: simulierte Abstandsmessung bei einem Winkel von 50° .....	35
Bild 4-14: simulierte Abstandsmessung an einer Kante.....	36
Bild 5-1: Sensorkennlinie a) ohne Offset und b) mit Offset .....	37
Bild 5-2: Lageanordnung mit 2 Sensoren .....	38
Bild 5-3: Schaltplan zu Messsystemauswertung.....	39
Bild 5-4: Leiterplattenfoto mit Beschriftung .....	40
Bild 5-5: Oszilloskopbilder der a) Start- und b) Grenzfrequenz.....	43
Bild 5-6: Frequenzgang der Messsystemauswertungsplatine.....	43

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Prüfung der Versorgungsspannungen.....	41
Tabelle 5-2: Funktionstest des Übersteuerungsschutzes.....	41
Tabelle 5-3: simulierte Funktionsprüfung .....	42

## Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$A$	Fläche	$m^2$
$A_c$	Plattenfläche	$m^2$
$A_{Fe}$	Querschnittfläche des Eisenkerns	$m^2$
$A_L$	Querschnittfläche des Luftspaltes	$m^2$
$A_{rel}$	relative Abweichung	%
$B$	magnetische Flussdichte	$\frac{V \cdot s}{m^2}$
$B_i$	induzierte magnetische Flussdichte	$\frac{V \cdot s}{m^2}$
$C$	Kapazität	$\frac{A \cdot s}{V}$
$D$	Verschiebungsflussdichte	$\frac{A \cdot s}{m^2}$
$d$	Abstand	$m$
$d_c$	Plattenabstand	$m$
$E_i$	fiktive elektrische Feldstärke	$\frac{V}{m}$
$H$	magnetische Feldstärke	$\frac{A}{m}$
$h$	Höhe	$m$
$I$	Stromstärke	$A$
$J$	Stromdichte	$\frac{A}{m^2}$
$J_K$	Konvektionsstromdichte	$\frac{A}{m^2}$

Alternative Wirbelstrommesssystemanordnungen zur axialen Lagerfassung  
einer magnetisch gelagerten Welle

---

$J_V$	Verschiebungsstromdichte	$\frac{A}{m^2}$
$L$	Induktivität	$\frac{V \cdot s}{A}$
$L_{\max}$	maximale Induktivität	$\frac{V \cdot s}{A}$
$l$	Länge	$m$
$l_A$	Länge der Ankathete	$m$
$l_{Fe}$	mittlere Feldlinienlänge des Eisenkerns	$m$
$l_L$	mittlere Feldlinienlänge des Luftspaltes	$m$
$N$	Anzahl der Windungen	
$Q_L$	Spulengüte	
$R_S$	Spulenwiderstand	$\frac{V}{A}$
$s$	Weg	$m$
$s_0$	Anfangsweg	$m$
$S_1$	Signalwert von Sensor 1	$V$
$S_2$	Signalwert von Sensor 2	$V$
$S_{Ax}$	Signalwert der Axiallagerachse	$V$
$t$	Zeit	$s$
$U_A$	Ausgangsspannung	$V$
$U_r$	richtige Signalspannung der Sollwertgeraden	$V$
$U_S$	Messsignalspannung	$V$
$u_i$	induzierte Spannung	$V$

Alternative Wirbelstrommesssystemanordnungen zur axialen Lageerfassung  
einer magnetisch gelagerten Welle

---

$v$	mittlere Geschwindigkeit	$\frac{m}{s}$
$V_G$	Gesamtverstärkung	
$x$	x-Koordinate	
$x_1$	x-Koordinate des Punktes $P_1$	
$x_2$	x-Koordinate des Punktes $P_2$	
$y$	y-Koordinate	
$y_1$	y-Koordinate des Punktes $P_1$	
$y_2$	y-Koordinate des Punktes $P_2$	
$\alpha$	Winkel	$^\circ$
$\epsilon_0$	elektrische Feldkonstante	$8,854188 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$
$\epsilon_r$	relative Permittivität	
$\kappa$	elektrische Leitfähigkeit	$\frac{A}{V \cdot m}$
$\mu$	Permeabilität	$\frac{V \cdot s}{A \cdot m}$
$\mu_0$	magnetische Feldkonstante	$4\pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$
$\mu_{rFe}$	relative Permeabilität von Eisen	
$\mu_{rL}$	relative Permeabilität von Luft	
$\varrho$	Raumladungsdichte	$\frac{A \cdot s}{m^3}$
$\Phi$	magnetischer Fluss	$V \cdot s$
$\Psi$	verketteter Fluss, Induktionsfluss	$V \cdot s$
$\omega$	Kreisfrequenz	$s^{-1}$

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
bzw.	Beziehungsweise
d.h.	das heißt
FEMM	finite element method magnetics
Gl.	Gleichung
IC	integrated circuit
i.O.	in Ordnung
OPV	Operationsverstärker
RC (-Oszillator)	Widerstand-Kondensator-Schwingkreis
z.B.	zum Beispiel

## 1. Einleitung

Magnetlager werden in der Praxis oft dort eingesetzt, wo für die Anwendung sehr hohe Drehzahlen gefordert werden. Die Realisierung solcher Anwendungsfälle ist mit konventionellen Lagertechniken, wie zum Beispiel mit Gleit- und Wälzlager, aufgrund der mechanischen Reibung nur mit hohen Verlusten möglich. Magnetlager arbeiten dagegen völlig berührungslos und sind somit verschleiß- und wartungsfrei. Deshalb können Magnetlagersysteme aufgrund ihrer Schmiermittelfreiheit im Vakuum und für Reinraumanwendungen eingesetzt werden.

Um solch einen Rotor, zum Beispiel die Welle eines Antriebs, magnetisch zu lagern, werden von den aktiven Magnetlagern Zugkräfte auf die entsprechenden Rotorblechpakete ausgeübt. Dabei sind die Magnetlager so angeordnet, dass alle fünf Lageachsen ausgegeregelt werden können, wie es im Bild 1-1 dargestellt ist.

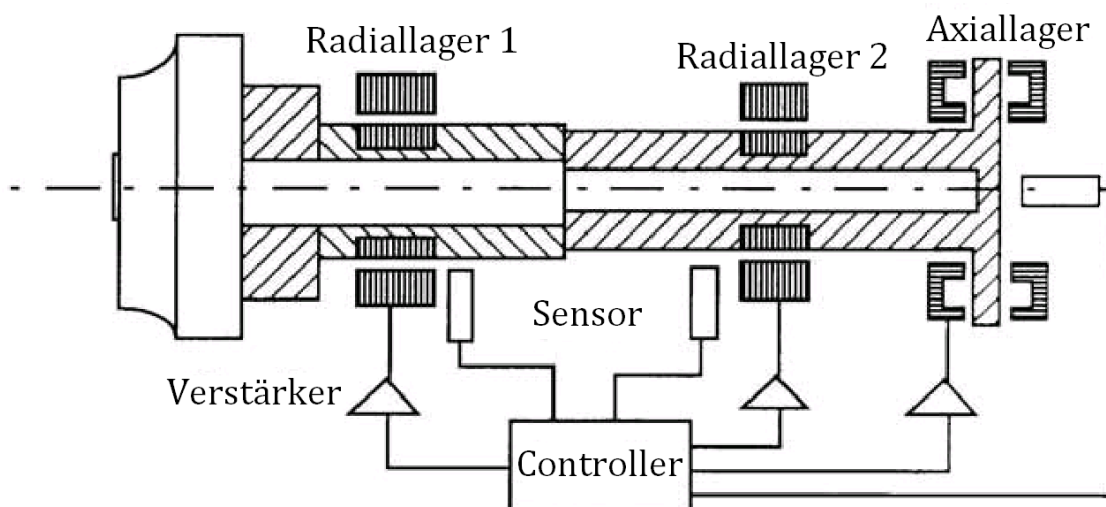


Bild 1-1: Aufbau einer magnetisch gelagerten Welle [1, S.25]

Diese sind jeweils die x- und y-Richtung in beiden Radiallagerebenen und die z-Achse der axialen Richtung längs entlang der Welle. Damit diese Regelung funktionieren kann, ist es notwendig die Lage des Rotors permanent an allen fünf Lageachsen zu erfassen und dem Regelkreis zu übergeben. Hierfür werden vor allem kapazitive, induktive, optische und Wirbelstromverfahren genutzt.

Die axiale Lageerfassung erfolgt in der Regel mit Wirbelstromsensoren an der Stirnfläche des Rotors oder mit einem optischen Messsystem an einem Absatz der

Welle. Ist aus konstruktionstechnischen Gründen ein solcher Absatz nicht vorhanden oder kann kein optisches Messsystem eingesetzt werden und steht gleichzeitig kein freies Wellenende zum Einsatz eines Wirbelstromsensors zur Verfügung, so muss ein alternatives Lageerfassungssystem bzw. eine alternative Messsystemanordnung verwendet werden.

## **2. Wegmesssysteme für magnetisch gelagerte Wellen**

### **2.1 Anforderungen**

Die Anforderungen an die Messeinrichtungen im Regelkreis eines aktiven Magnetlagers liegen darin, möglichst verzögerungsfrei, berührungslos und linear die Bewegungsgrößen der Welle zu erfassen. Dabei sind konkretere Anforderungen vom individuellen Applikationsfall abhängig. Allgemein können nach [1, S.15] folgende Anforderungen gestellt werden:

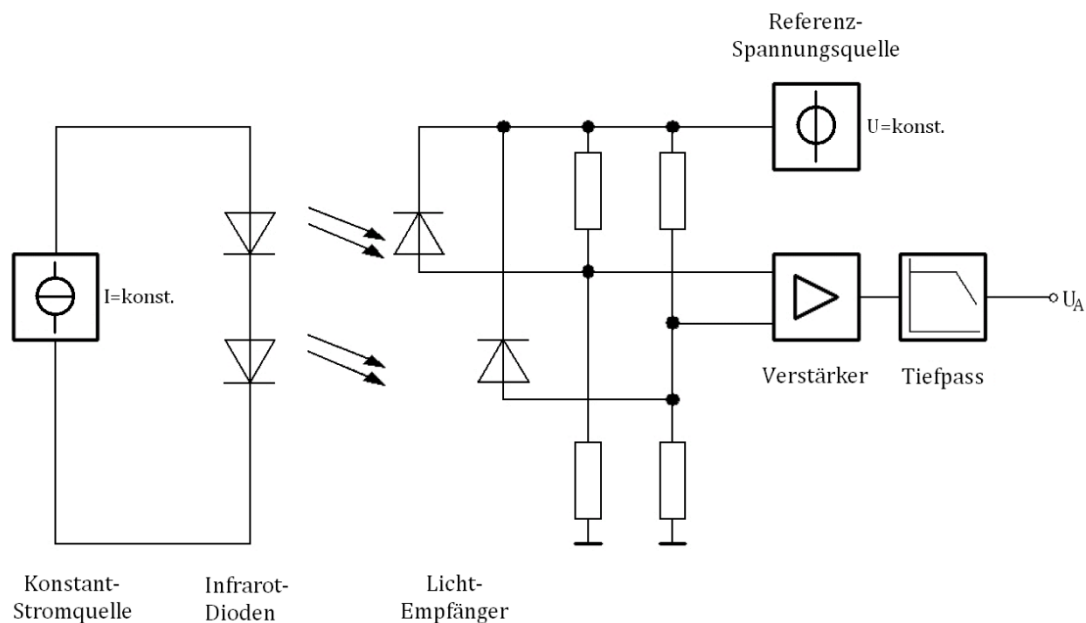
- Messbereich ca. 0,1 ... 1,0 mm (max. Bewegungsfreiheit der Welle)
- Auflösung ca. 1  $\mu\text{m}$  (je nach gewünschter Laufgenauigkeit des Lagers)
- Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen (Staub, Nässe, ...)

Als mögliches Messsystem können kapazitive, optische, akustische und induktive Wirkprinzipien zur Erfassung des Bewegungszustandes und der Rotorlage verwendet werden. In der Praxis der Firma EAAT haben sich Messsysteme bewährt, die nach dem optischen, induktiven, kapazitiven oder nach dem Wirbelstromverfahren arbeiten [1, S.15].



## 2.2 Optisches Wegmesssystem

Das Grundprinzip der optischen Wegmesssysteme ist das der Lichtschranke, indem eine Lichtquelle gegenüber einem Lichtempfänger steht. Wird nun diese Strecke von einem lichtundurchlässigen Gegenstand durchquert, so dass der Lichtstrom geschwächt wird, reagiert der Empfänger am Ausgang mit einer Spannungsänderung darauf. Bei einer herkömmlichen Lichtschranke wird mittels eines Komparators aufgrund vorgegebener Grenzen ein Binärsignal daraus gebildet, währenddessen beim optischen Wegmesssystem das Analogsignal des Lichtempfängers ausgewertet wird. Dieses Signal verhält sich im Idealfall linear zur vom Gegenstand verursachten Abschattung [1, S.20].



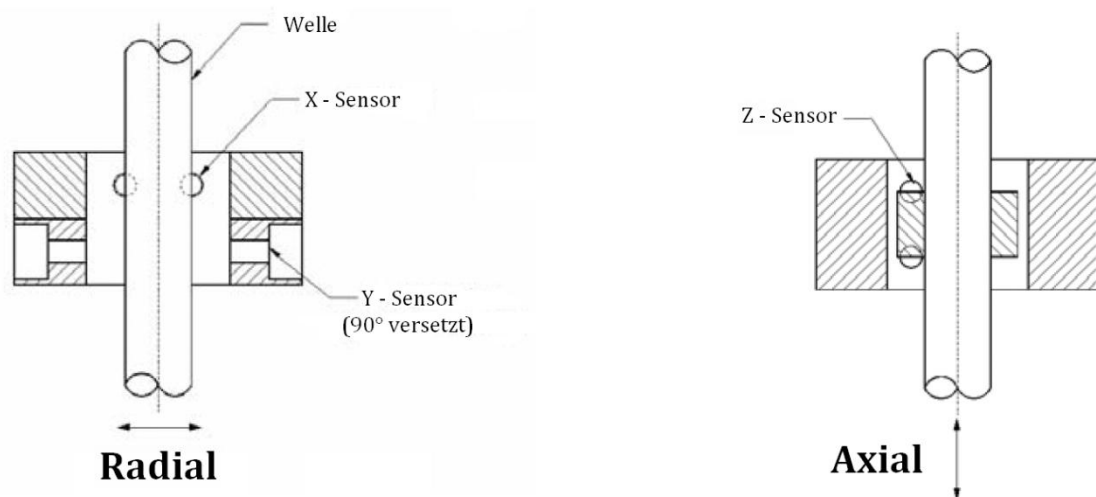
**Bild 2-1: Blockschaltbild eines optischen Wegmesssystems [1, S.21]**

Der prinzipielle Schaltungsaufbau für eine Bewegungskordinate eines optischen Wegmesssystems ist im Bild 2-1 dargestellt. Dabei werden die zwei Infrarotsendendioden von einer hochkonstanten Stromquelle gespeist, während die beiden Lichtempfänger über einen Instrumentationsverstärker im Differenzverfahren ausgewertet werden. Messfehlern aufgrund thermischer Längenänderungen der Welle und des Gehäuses wird somit vorgebeugt [1, S.21].

Das optische Wegmesssystem hat dabei folgende technische Daten:

- Statischer Übertragungsfaktor: 20 V/mm
- Messbereich:  $\pm 0,1$  mm
- -3-dB-Grenzfrequenz des Messsignals: 20 kHz
- Auflösung:  $0,1 \mu\text{m}$

Eine Trägerfrequenz für das Messsignal ist für das optische Messsystem aufgrund des durchweg analogen Messverfahrens nicht notwendig, wodurch sich auch keine nennenswerten Verzögerungszeiten ergeben [1, S.21].



**Bild 2-2: konstruktiver Aufbau des optischen Wegmesssystems [1, S.21]**

Der konstruktive Einbau der optischen Lageerfassung in ein magnetgelagertes System erfolgt so, dass die beiden Lichtschranken einer Lagerachse die Welle auf beiden Seiten, um  $90^\circ$  zur Lageachse versetzt, streift, wie es im Bild 2-2 zu sehen ist. Der Lichtkegel wird dabei auf jeder Seite zur Hälfte abgeschattet, so dass die Abschattung das Maß der Lageabweichung der Welle darstellt. Die Messgenauigkeit des Systems ist sowohl von der Oberflächenbeschaffenheit der Messspur in Form von Unrundheiten und Rauigkeiten, als auch von den induzierten Störspannungen der Leistungsschaltglieder begrenzt. Diese können eine Messungenauigkeit von ca.  $1 \mu\text{m}$  hervorrufen. Feuchtigkeit, Fremdlicht oder Staub sind generell von optischen Messsystemen fernzuhalten [1, S.22].

### 2.3 Kapazitives Wegmesssystem

Ebenso wie induktive Sensoren und optische Messstrecken arbeiten kapazitive Sensoren rückwirkungsfrei und berührungslos. Dabei werden Anwendungsbereiche erschlossen, in denen das induktive oder optische Funktionsprinzip versagt, da mit kapazitiven Sensoren auch nichtleitende Materialien detektiert werden können. Sie werden meistens als Näherungsschalter angeboten, wobei auch kapazitive Analoggeber, die ein dem Abstand eines Gegenstandes linear abhängiges Ausgangssignal liefern, möglich sind. Träger der Information sind bei kapazitiven Sensoren die elektrischen Ladungen eines elektrostatischen Feldes auf dem Kondensator. Dabei lässt sich die physikalische Wirkungsweise immer auf eine bestimmte Kondensatorbauform zurückführen. Der Flächenkondensator ist die einfachste Bauform, für den mit Dielektrikum gilt [2, S.28][3, S.141] [6, S.137]:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A_c}{d_c} \quad (\text{Gl. 2-1})$$

Diese Bauform eines Plattenkondensators ist auch die Grundlage für die kapazitive Wegmessung bei Magnetlagern. Zwischen den Kondensatorplatten dient als Dielektrikum in der Regel Luft, dadurch kann mit  $\varepsilon_r = 1$  in erster Näherung gerechnet werden. Somit bilden nur noch die geometrischen Größen Plattenfläche  $A_c$  und Plattenabstand  $d_c$  die Abhängigkeit zur Kapazität des Messkondensators [1, S.19].

Dabei lassen sich für Magnetlager zwei Messprinzipien realisieren:

1. Die Plattenfläche  $A_c$  ist und bleibt konstant, während der Plattenabstand  $d_c$  veränderlich ist. Dieses Prinzip ist im Bild 2-3 zu sehen und findet Anwendung bei Messsystemen für radiale Bewegungen.

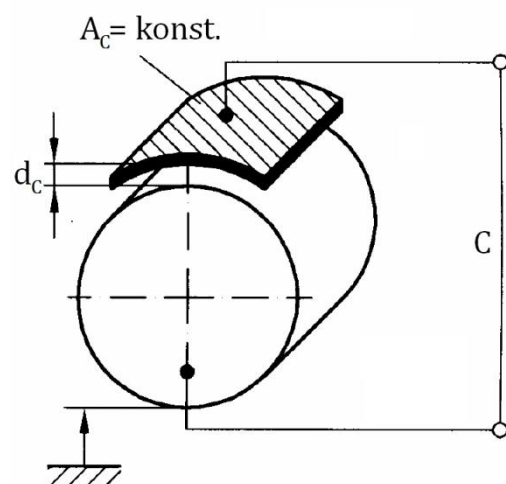


Bild 2-3: radiales kapazitives Messprinzip [1, S.19]

2. Die Plattenfläche  $A_c$  ist veränderlich und der Plattenabstand  $d_c$  konstant. Diese Variante wird zur Lageerfassung bei Axialmagnetlagern eingesetzt und ist im Bild 2-4 abgebildet.

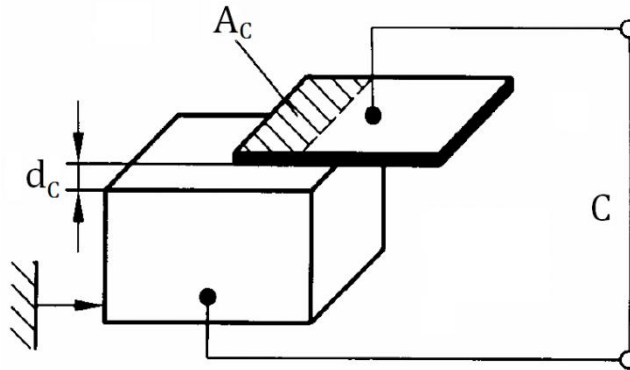
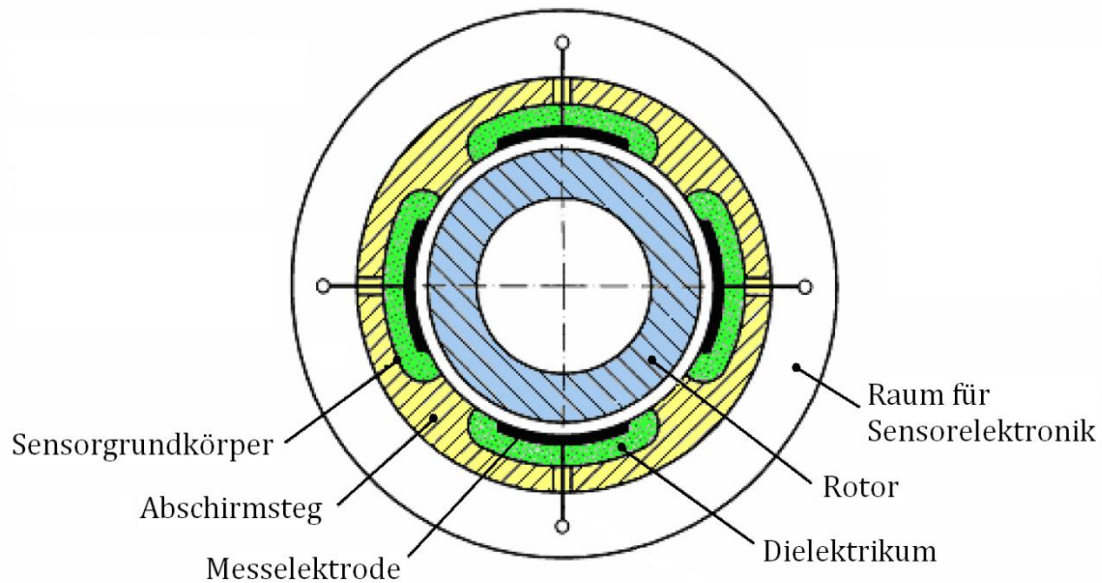


Bild 2-4: axiales kapazitives Messprinzip [1, S.19]

Kapazitive Sensoren besitzen eine sehr große Messempfindlichkeit bei kleinen Messwegen und sind daher sehr gut zur Erfassung schnell ablaufender Vorgänge geeignet. Die Kapazität muss mit hoher Genauigkeit und Auflösung gemessen werden, um solch eine hohe Messauflösung für die geometrischen Änderungen zu erhalten. Dabei liegt die Kapazität zwischen den Kondensatorbelägen oft im pF-Bereich ( $10^{-12}$  F). Die durch die geometrische Größenänderung hervorgerufene Kapazitätsänderung liegt dagegen im Bereich von  $10^{-15}$  bis  $10^{-16}$  F. Um solch kleine Kapazitäten bestimmen zu können, muss das Trägerfrequenzverfahren genutzt werden. Des Weiteren wird das Prinzip des Differentialkondensators angewendet, um den hohen Ansprüchen an Nullpunktstabilität und Linearität gerecht zu werden. In diesem Fall besitzt der Messkondensator zwei getrennte Beläge. Wird das Messobjekt nach einer Richtung ausgelenkt, verringert sich die Kapazität des einen Belages während die des anderen erhöht wird. Aufgrund des beim Einbau erhöhten Justieraufwandes, werden die Sensoren für zwei radiale Messachsen konstruktiv in einem robusten Sensorring zusammengefasst. Der streukapazitätsempfindliche Teil der Sensorelektronik ist ebenfalls im Sensorring integriert. Ein solcher einbaufertiger Sensorring für die radiale Wellenposition ist im Bild 2-5 dargestellt [3, S.141] [1, S.18-20].



**Bild 2-5: Querschnitt eines radialen Sensorringes [1, S.20]**

Ein bei EAAT entwickeltes kapazitives Messsystem hat folgende Daten [1, S.20]:

- Trägerfrequenz: ca. 180 kHz
- Statischer Übertragungsfaktor: 20 V/mm
- Messbereich:  $\pm 0,6$  mm
- -3-dB-Grenzfrequenz des Messsignals: 25 kHz
- Verzögerungszeitkonstante: 8  $\mu$ s
- Messauflösung: 0,05  $\mu$ m

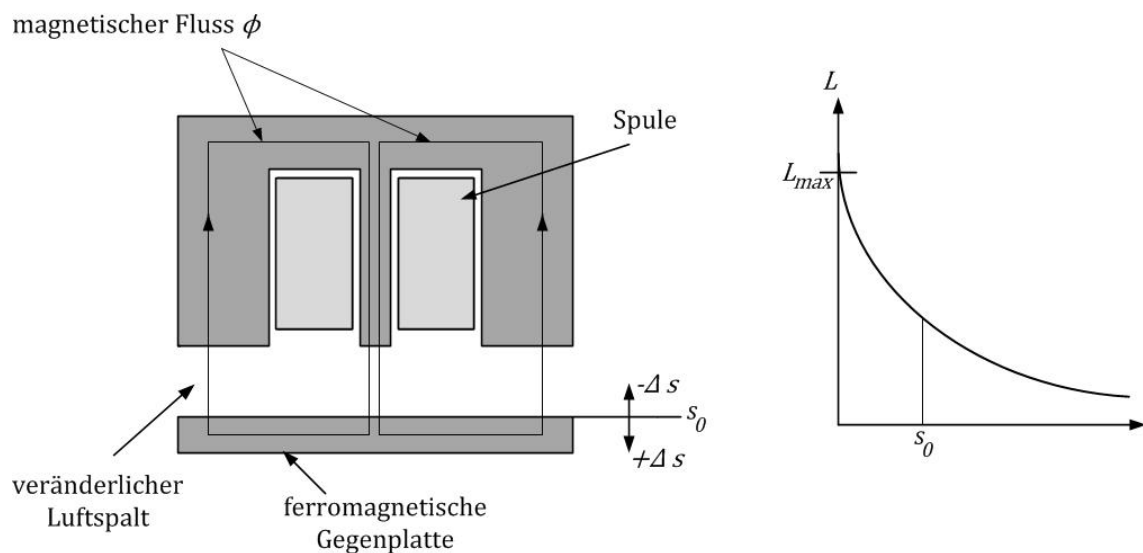
Da kapazitive Sensoren Teil eines RC-Oszillators sind, besteht eine hohe Störempfindlichkeit gegenüber elektrischen Wechselfeldern, welche über die Sensorelektrode in den hochohmigen Eingangskreis des Oszillators eingekoppelt werden und dort Schwingungen anregen können. Einen weiteren Nachteil bilden Temperatureinflüsse, die sich ebenfalls auf den RC-Oszillator auswirken und in den Sensor eindringende Substanzen, wie zum Beispiel Öle, Fette oder Wasser, die eine Dielektrizitätskonstantenänderung hervorrufen und somit den Messwert verfälschen [2, S.32] [3, S.141].

## 2.4 Induktives Wegmesssystem

Das Funktionsprinzip induktiver Sensoren gründet sich darauf, dass die Induktivität  $L$  einer Spulenordnung in Abhängigkeit zu deren geometrischen Größen steht. Dazu gehören die Länge der magnetischen Feldlinien und der Flächenquerschnitt, der von dem magnetischen Fluss durchsetzt wird. Des Weiteren wird die Induktivität noch von der Anzahl der Spulenwindungen  $N$  und der vom flussdurchsetzten Medium abhängigen Permeabilität  $\mu$  bestimmt. Die für den induktiven Sensor erforderliche Induktivitätsänderung wird dabei über einen in der Länge veränderlichen Luftspalt im Eisenkern erreicht. Für die damit erhaltene veränderliche Induktivität gilt bei guter Näherung ( $A_{Fe} = A_L$  und  $\mu_{rL} = 1$ ):

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot A_{Fe}}{\frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} + l_L} \quad (\text{Gl. 2-2})$$

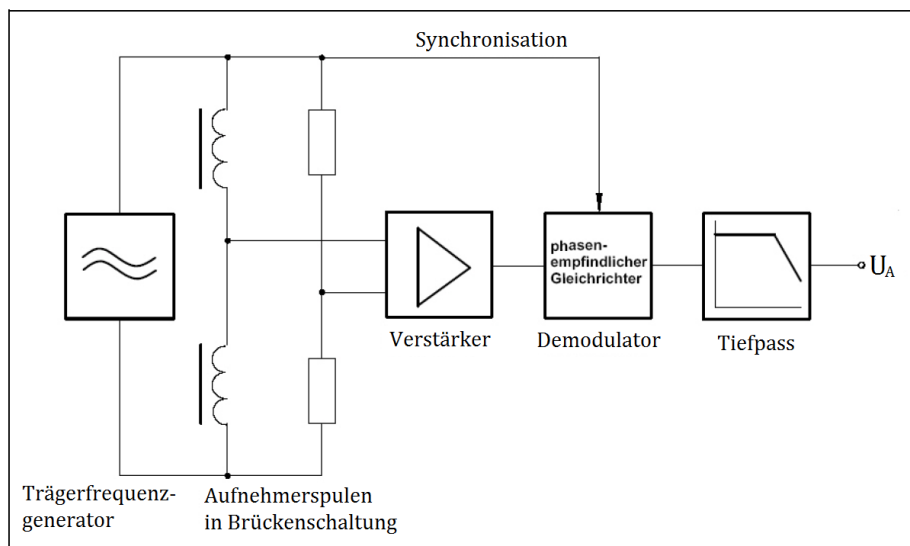
Das Funktionsprinzip und die zugehörige Übertragungskurve eines berührungslosen induktiven Sensors ist im Bild 2-6 dargestellt [6, S.131,132].



**Bild 2-6: Funktionsprinzip induktiver Sensor mit Übertragungskurve**

Anhand der Übertragungskurve ist deutlich zu erkennen, dass zwischen dem Weg  $s$  und der sich ergebenden Induktivität  $L$  ein nichtlinearer Zusammenhang besteht. Um diesen Zusammenhang messtechnisch nutzen zu können, muss die Übertragungskurve als linear angesehen werden, doch dies trifft nur bei kleinen Wegänderungen  $\Delta s$  zu. Aus diesem Grund sind induktive Sensoren nur für kleine

Wegmessungen von ca. 1 mm geeignet. Es können auch größere Messlängen von bis 10 mm realisiert werden, welche aber die Empfindlichkeit des Sensors drastisch herabsetzt und zudem die Störanfälligkeit gegen externen elektromagnetischen Feldern verstärkt. Eine Induktivitätsänderung kann dadurch ausgewertet werden, dass die Spule in eine Wechselstrombrücke eingefügt wird. Die eigene Selbstinduktivität bestimmt dabei den Wechselstromwiderstand. Den aktiven Teil der Messbrücke bildet je ein induktiver Aufnehmer, der rechts oder links vom Messobjekt für eine Lagerkoordinate angeordnet wird. Die Auswertung der Induktivität erfolgt über ein Trägerfrequenzsignal. Im Bild 2-7 ist der prinzipielle Aufbau eines induktiven Wegmesssystems dargestellt [6, S.132,133] [1, S.16].



**Bild 2-7: prinzipieller Aufbau eines induktiven Wegmesssystem [1, S.15]**

Ein induktives Wegmesssystem kann folgende technische Daten haben[1, S.16]:

- Trägerfrequenz: 50 kHz
- Statischer Übertragungsfaktor: 20 V/mm
- Messbereich:  $\pm 0,6$  mm
- -3-dB-Grenzfrequenz des Messsignals: 5 kHz
- Verzögerungszeitkonstante: 35  $\mu$ s
- Auflösung: ca. 5  $\mu$ m

### 3. Wirbelstrommesssystem

#### 3.1 Wirbelstrom allgemein

Wirbelströme sind elektrische Ströme, die sich räumlich in elektrisch leitenden Materialien infolge einer Magnetfeldänderung einstellen. Dabei besitzen Wirbelströme in sich geschlossene Stromlinien, ähnlich dem Magnetfeld, wodurch sich der Begriff des Wirbels aus der Feldlehre erklären lässt.

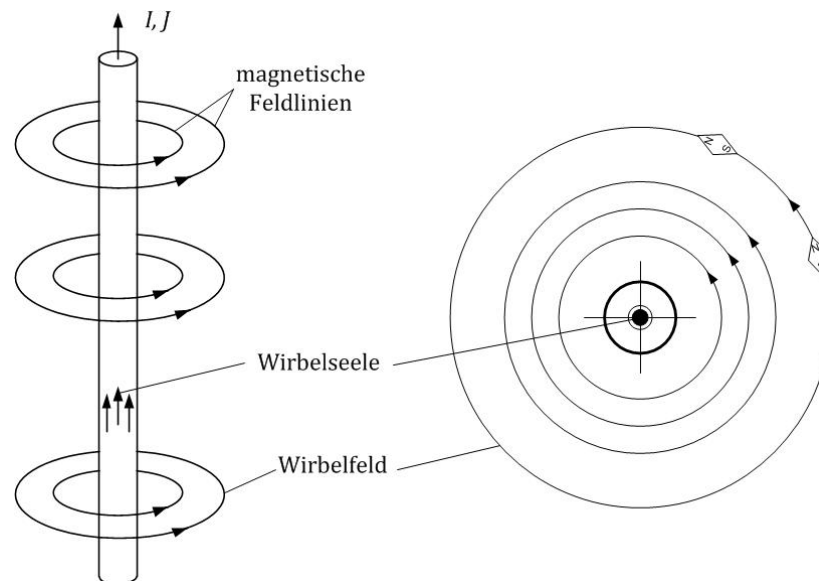
##### 3.1.1 Wirbelfeld

„In der Hydrodynamik werden Strömungen, deren Rotation nicht verschwindet, Wirbel genannt. Diesen anschaulichen Sprachgebrauch verallgemeinernd werden Vektorfelder wirbelfrei genannt, wenn ihre Rotation verschwindet, und wirbelbehaftet bzw. Wirbelfelder, wenn sie dies nicht tut [4, S.20].“ Demzufolge hat das zeitunabhängige elektrische Feld zwar Quellen, was die elektrischen Ladungen darstellen, aber jedoch keine Wirbel. Das nur vom Gleichstrom herrührende stationäre Magnetfeld ist dagegen ein reines Wirbelfeld, solange ein Strom  $I$  vom Umlaufintegral der magnetischen Feldstärke  $H$  umfasst wird. Bei Dauermagnetanordnungen werden allerdings gar keine Ströme umschlossen, wodurch das Magnetfeld als wirbelfrei betrachtet wird. In diesem Fall kann nur ein skalares magnetisches Potential für dieses Gebiet vereinbart werden. Des Weiteren sind Magnetfelder quellenfrei, denn es gibt keine magnetischen Ladungen in denen die magnetischen Kraft- und Feldlinien beginnen oder enden könnten. Sie sind in sich geschlossen. Auch die sich ausbildenden Magnetpole geben nur die Richtung der Feldlinien an und sind keineswegs als Anfang oder Ende der Kraftlinien zu sehen [5, S.206, 228].

Zu einem Wirbel gehören weiterhin zwei Bestandteile, die am Beispiel eines stromdurchflossenen, langen und geradlinigen Leiters im Bild 3-1 veranschaulicht werden sollen. Dieser Draht, dessen Rückleiter weit entfernt ist, wird von einem Gleichstrom  $I$  durchflossen, wobei sich ein Magnetfeld um den Leiter ausbildet. Dieses magnetische Feld hat nicht die Form einer Spirale um den Leiter, sondern die Feld- und Kraftlinien derselben Stärke bilden konzentrische Kreise in einer



Ebene, die der Leiter senkrecht durchstößt. Die Stärke der Feldlinien nimmt dabei nach außen hin ab.



**Bild 3-1: stromdurchflossener Leiter**

Der erste Bestandteil eines Wirbels ist das Wirbelfeld, welches hier im Beispiel die Gesamtheit aller um den Strom auftretenden magnetischen Feldlinien bildet. Gekennzeichnet wird es durch die Wirbelstärke. Der zweite Bestandteil ist der Wirbelkern, der auch Wirbelfaden oder Wirbelseele genannt wird. Er ist die Feldlinie im Kern des Wirbels, also hier im Beispiel die Feldlinie des Stromes bzw. der Stromdichte im Leiter, die senkrecht zum Wirbelfeld steht. [5, S.207, 208].

### 3.1.2 Durchflutungssatz und Induktionsgesetz

Dieser Effekt, dass sich um einen Strom  $I$  ein magnetisches Wirbelfeld bildet, ist auf den Durchflutungssatz in allgemeiner Form zurückzuführen. Dabei tragen zur Durchflutung alle Stromarten bei. Diese sind der Konvektionsstrom, welcher durch die Konvektionsstromdichte  $J_K = v\rho$  gekennzeichnet ist und der in Nichtleitern durch die Verschiebungsstromdichte  $J_V = \delta D/\delta t$  gekennzeichnete Verschiebungsstrom. Damit kann sich also die Gesamtstromdichte  $J$  in räumlich ausgedehnten Strömungsfeldern sehr unterschiedlich verteilen. Dazu wird die vom Umlaufintegral eingeschlossene Fläche in Flächenelemente  $dA$ , in denen die Stromdichte  $J$  als konstant angesehen werden kann, zerlegt und erhält:

$$\oint H \cdot ds = \int_A J \cdot dA = \int_A \left[ \rho v + \frac{\partial D}{\partial t} \right] \cdot dA \quad (\text{Gl.3-1})$$

Durchflutungssatz, erste Maxwellsche Gleichung in Integralform [5, S.227].

„In Worten: Das Umlaufintegral der magnetischen Feldstärke längs eines Weges  $s$  ist gleich dem Flächenintegral der Stromdichte über der Fläche  $A$ , die vom geschlossenen Weg  $s$  begrenzt wird [5, S.227].“

Die Richtung von  $dA$  bzw.  $I$  zu  $ds$  bzw.  $H$  (Umlaufrichtung des Linienintegrals) ist der Rechtsschraubenregel zugeordnet [5, S.227].

Aufgrund der doppelten Verkopplung zwischen magnetischem und elektrischem Feld ist die Gesetzmäßigkeit des Durchflutungssatzes auch im umgekehrten Fall gültig. Eine elektrische Feldstärke entsteht um jeder Art von Magnetflussänderungen. Diese Erscheinung wird durch das Induktionsgesetz erfasst und heißt Induktion. In einem ringförmigen, geschlossenen Leiterkreis fließt ein Strom sobald dem Leiterkreis ein Magnet genähert wird. Dies wurde schon im Jahr 1831 von Michael Faraday entdeckt, wobei er auch bemerkte, dass sich die Stromrichtung bei Entfernung des Magneten ändert. Da im allgemeinen Sinne der Stromfluss eine Spannung als Antriebsursache voraussetzt, ist zu schlussfolgern, dass durch die Änderung des Magnetfeldes in der dem magnetischem Feld umgebenden Leiterschleife eine Spannung entsteht, die so genannte induzierte Spannung  $u_i$ . Demnach gilt:

$$u_i = \oint E_i \cdot ds = - \frac{d\Psi(t)}{dt} = - \frac{d}{dt} \left( \int_{A(t)} B(t) \cdot dA \right) \quad (\text{Gl.3-2})$$

Zweite Maxwellsche Gleichung in Integraldarstellung, Induktionsgesetz [5, S.262].

„In Worten: Bei zeitlicher Änderung des Gesamtinduktionsflusses  $\Psi$  durch eine von einem materiellen Leiter oder gedachten Weg umschlossene Fläche tritt längs eines geschlossenen Weges eine Umlaufspannung  $u_i$  auf. Sie ist das Wegintegral einer induzierten Feldstärke  $E_i$  und Ursache des Stromantriebes im allgemeinen Sinn längs des geschlossenen Weges und gleich dem magnetischen Schwund  $-d\Psi/dt$  [5, S.262].“

Nach dem Induktionsgesetz in der Schreibweise  $u_i \sim d\Psi/dt$  entsteht leicht der Eindruck einer lokalisierbaren und messbaren Spannungsquelle, die den Strom antreibt. Diese Spannung ist aber nur speziell bei einer offenen Leiterschleife zu messen und das eher als Folge des Ladungsunterschiedes als zur Ursache der Ladungstrennung. Denn die Ladungsträgerverschiebung durch Induktionswirkung ist die Folge einer Kraftwirkung auf die Ladungsträger, welche auf einen eigenen physikalischen Raumzustand zurückgeführt werden kann, der induzierten Feldstärke  $E_i$ . Auch im elektrostatischen Feld wird der Raumzustand "Feldstärke" für die Kraftwirkung auf eine Ladung eingeführt. Dabei ist sie nicht davon abhängig, ob sich eine Ladung auch tatsächlich im Raum befindet, über der die Feldstärke gemessen werden kann. Genau deshalb muss für die Fähigkeit, dass ein sich zeitlich veränderbares Magnetfeld Kräfte auf Ladungen ausüben kann, eine fiktive Feldstärke  $E_i$  vereinbart werden. Demzufolge gilt nach [5, S. 270]: „das zeitveränderliche Magnetfeld ist stets mit einem elektrischen Induktionsfeld verkoppelt, dessen Integral über  $E_i$  längs eines geschlossenen Weges als induzierte Spannung  $u_i$  durch eine materielle oder gedachte Leiterschleife längs des Umlaufes nachgewiesen werden kann. Nur so ist die Gleichwertigkeit  $u_i = \oint E_i \cdot ds$  im Induktionsgesetz zu verstehen.“ Die Feldstärke  $E_i$  ist dabei dem Induktionsvektor  $B$ , für  $dB/dt < 0$  nach der rechten Handregel einer Rechtsschraube zugeordnet. Bei Flusszunahme hingegen kehrt sich die Richtung um und es ergeben sich die Verhältnisse wie im Bild 3-2 zu sehen ist [5, S.266-270].

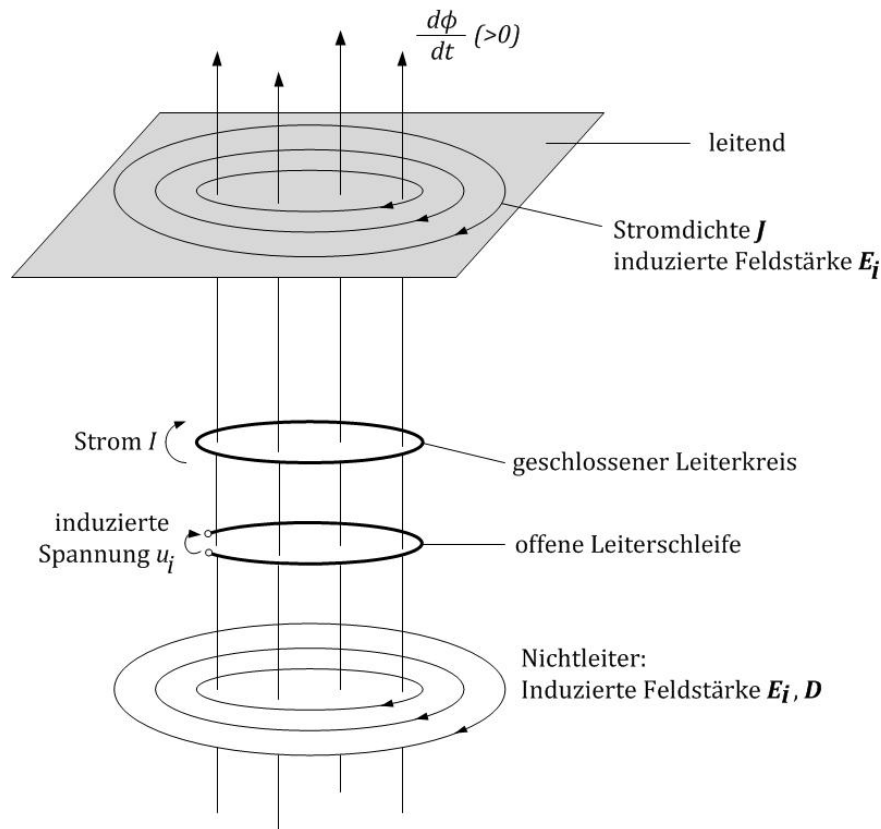


Bild 3-2: Wirkungen der Ruheinduktion

### 3.1.3 Wirbelstrom und seine Anwendungen

Das Induktionsgesetz trifft nicht nur bei einer Leiterschleife zu, sondern gilt für alle elektrisch leitenden Materialien unterschiedlicher Geometrie. Wird zum Beispiel eine Metallplatte von einem magnetischen Wechselfeld senkrecht durchdrungen, so wird nach dem Induktionsgesetz ein Wirbelfeld mit der Feldstärke  $E_i$  um die magnetischen Feldlinien herum im Metall induziert. Diese Feldstärke hat eine Kraftwirkung auf die Ladungsträger im Metall zur Folge, so dass diese sich aufgrund der Drehrichtung des Wirbelfeldes mit bewegen. Die bewegten Ladungen bilden so einen Stromfluss, den so genannten Wirbelstrom (Bild 3-2). Dabei stellen die magnetischen Feldlinien die Wirbelseele und die Wirbelströme das Wirbelfeld dar. Im Gegensatz zum Magnetfeld ist die Entstehung dieser Wirbelströme jedoch an zwei grundlegend elementare Voraussetzungen gebunden. Erstens, sie bilden sich nur in einem elektrisch leitenden Material aus. Die zweite Bedingung ist, dass die Wirbelströme nur erzeugt werden, wenn eine Änderung des Magnetfeldes, also der magnetischen Flussdichte  $B$ , stattfindet. Nur wenn beide Voraussetzungen erfüllt sind, können Wirbelströme entstehen. Für die

benötigte Magnetfeldänderung gibt es wiederum zwei Möglichkeiten. Entweder das Magnetfeld ist ein zeitveränderliches Feld (Ruheinduktion), also zum Beispiel mit Wechselstrom erzeugt, oder das elektrisch leitende Material wird durch ein konstantes Magnetfeld hindurch bewegt (Bewegungsinduktion). Im letzteren Fall wird der Wirbelstrom nur im Übergangsbereich zwischen dem vom Magnetfeld durchsetzten Teil und dem feldfreien Bereich erregt (Bild 3-3). Diese Art der

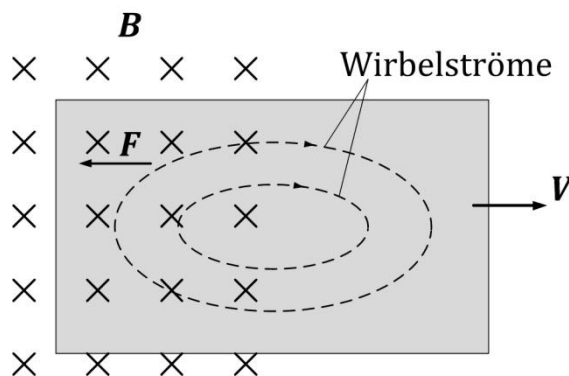


Bild 3-3: Prinzip der Wirbelstrombremse

Wirbelstromerzeugung wird bei der Wirbelstrombremse ausgenutzt, denn durch die entstandenen Wirbelströme bildet sich auch eine Kraft, die der ursprünglichen Bewegung entgegenwirkt. So muss diese Kraft überwunden werden, um zum Beispiel eine Metallplatte aus dem Magnetfeld herausziehen zu können (Bild 3-3). Die dafür

notwendige Bewegungsenergie wird durch die Wirbelströme in Wärme umgewandelt. Bei der Wirbelstrombremse sind Wirbelströme ein aktiver Bestandteil, der zur Funktion der Anwendung erforderlich ist. Doch dies ist in den meisten elektrotechnischen Anwendungen nicht der Fall, denn da sind Wirbelströme unerwünschte Nebenerscheinungen, die es zu kompensieren oder zumindest zu verringern gilt. Hierzu zählen nahezu alle elektrischen Maschinen. Egal ob im Transformator oder in der Gleichstrommaschine, die Wirbelströme verschlechtern den Wirkungsgrad. Im Transformator bilden sich aufgrund des zeitveränderlichen magnetischen Flusses (Ruheinduktion) Wirbelströme im Eisenkern mit unerwünschten Wärmeverlusten. Diese erhöhte Verlustenergie in Form von Wärme tritt auch im Rotor der Gleichstrommaschine auf, nur dass die Ursache für die Erzeugung der Wirbelströme in der Bewegungsinduktion liegt. Um diese Verlustleistung klein zu halten, muss der elektrische Widerstand des Eisenkerns in den Strombahnen möglichst groß sein. Dies wird erreicht, indem die Strombahnen des Wirbelstromes mit isolierenden Zwischenschichten unterbrochen werden. Der Eisenkern wird also mit 0,1 mm bis 0,3 mm dicken Eisenblechen ersetzt, welche eine einseitige Isolierung aus Lack oder Papier besitzen. Eine weitere Möglichkeit die Wirbelströme einzudämmen, ist die

Verwendung von Pulverkernmaterialien oder Ferriten als Eisenkernmaterial. Pulverkernmaterialien sind zum Beispiel in Kunstharz eingebettetes Eisenpulver mit hohem spezifischem elektrischem Widerstand, während Ferrite elektrisch nichtleitende ferromagnetische Werkstoffe sind. Wirbelströme werden aber auch bewusst zur Erwärmung genutzt, zum Beispiel in der Medizin bei Wirbelstromheizungen, in der Metallurgie bei der Hochfrequenzhärtung oder ganz aktuell beim Kochen mit dem Induktionsherd. Da die magnetische Flussänderung proportional zum Wirbelstrom ist und somit auch proportional zur Wärmeentwicklung, muss die Flussänderung für gute Erwärmung möglichst groß sein, weshalb dafür hohe Frequenzen zum Einsatz kommen [5, S.274-276].

Da Wirbelströme in sich geschlossene elektrische Ströme sind, erzeugen auch sie wiederum ein Magnetfeld gleich dem eines stromdurchflossenen Leiters. Dies kann sehr gut am Beispiel des Skineffektes dargestellt werden. Der Skineffekt ist ein Effekt der Stromverdrängung in elektrischen Leitern bzw. ein Effekt der Feldverdrängung im magnetischen Leiter. Bei schnellen zeitlichen Änderungen wird die wechselseitige Verkopplung des elektrischen und magnetischen Feldes besonders deutlich. Im Bild 3-4a ist die Verkopplung an einem stromdurchflossenen Leiter mit der homogenen Ausgangsstromdichte  $J$  dargestellt. Um den Strom  $I$  entsteht auch im Leiter nach dem Durchflutungssatz bei schnellen zeitlichen Änderungen ein zeitveränderliches Magnetfeld, welches wiederum nach dem Induktionsgesetz eine Feldstärke  $E_i$  um seine Feldlinien herum induziert und nach dem Leiterzentrum zunimmt. Dadurch wird die Stromdichte in der Mitte des Leiters verringert. Es tritt eine Vergrößerung des Leiterwiderstandes ein. Zudem kommt noch hinzu, dass eine magnetische Feldveränderung entsteht, indem das Magnetfeld im Kerninnern durch das Magnetfeld der Wirbelströme geschwächt wird, während es im Kernäußeren verstärkt wird. Somit tragen dann bei sehr hohen Frequenzen zur Leitung nur noch die äußersten Leiterschichten bei. Deshalb reicht es Litze, so genannte hochfrequent-Litze (HF-Litze) oder einen dünnen, gut leitenden Niederschlag (z.B. Silber) auf einem Isolator als elektrischen Leiter zu verwenden völlig aus. In der Ultrahochfrequenztechnik werden auf Grund dessen auch die Leiterteile versilbert [5, S.275,276].

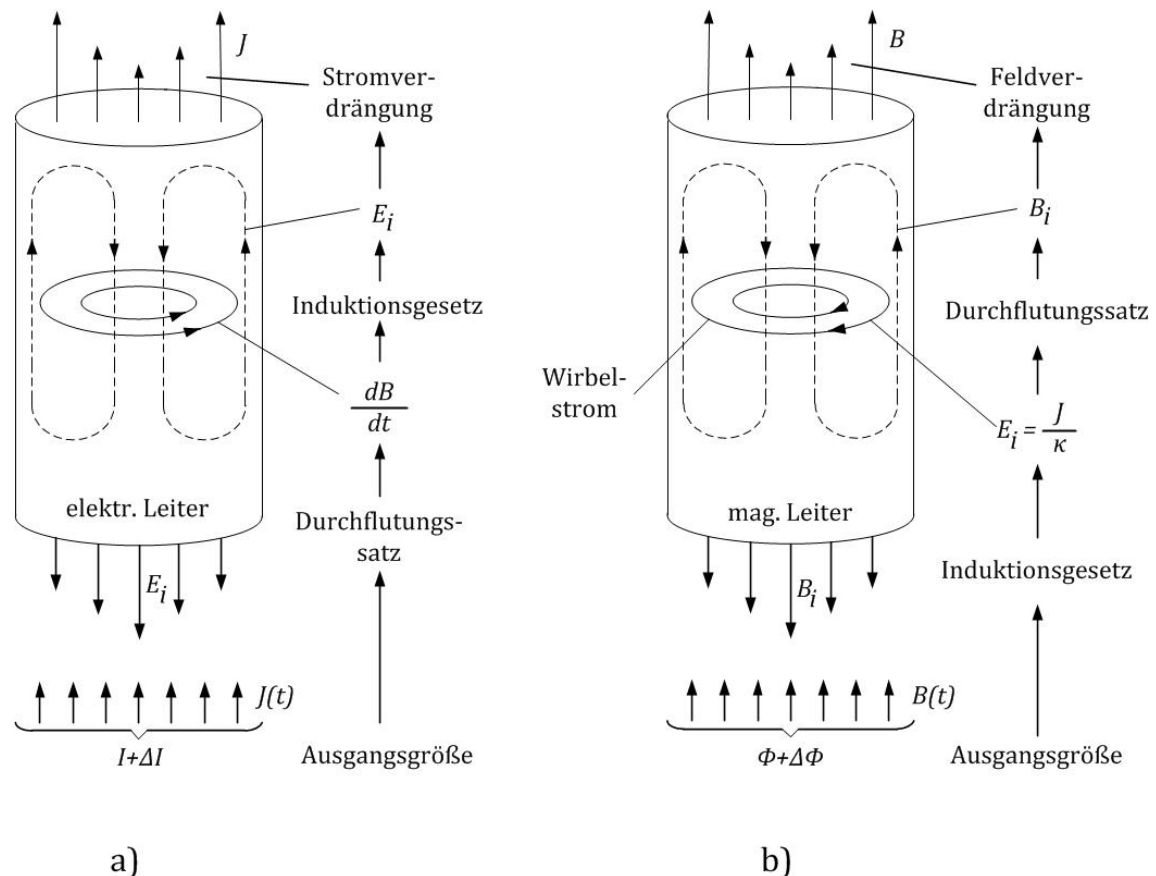


Bild 3-4: a) Strom- und b) Feldverdrängung (Skineffekt)

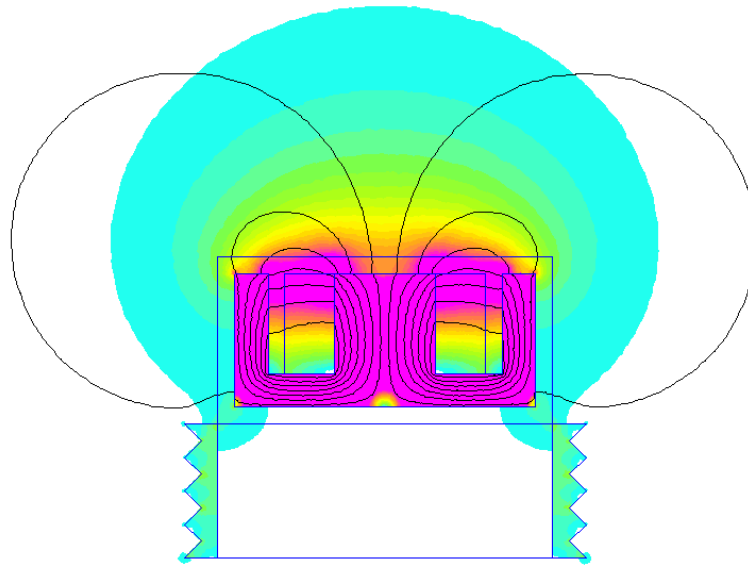
Im magnetischen Leiter (z.B. Eisen) läuft ein ganz analoger Vorgang ab (Bild 3-4b). Um den zeitveränderlichen Magnetfluss wird nach dem Induktionsgesetz ein Feldstärkefeld  $E_i$  induziert, das wiederum einen Stromwirbel im massiven magnetischen Leiter erzeugt. Der Wirbelstrom verursacht seinerseits nach dem Durchflutungssatz wieder ein Magnetfeld, welches das ursprüngliche Feld im achsennahen Bereich schwächt [5, S.276].

Wirbelströme werden auch für Abstandssensoren genutzt, die so genannten Wirbelstromsensoren. Dieses Messsystem wird im nächsten Kapitel näher erläutert.

### 3.2 Wirbelstromsensoren

Wirbelstromsensoren sind Sensoren, die den Abstand zu einem elektrisch leitfähigen Messobjekt berührungslos erfassen. Sie gehören zur Familie der induktiven Sensoren, da auch bei ihnen der aktive Teil eine Spule darstellt. Diese Spule ist direkt im zylindrischen Sensorkopf auf einen Ferritkern gewickelt,

welcher die Spule auch außen umgibt. Mit dem von einem Oszillator erzeugtem hochfrequenten Wechselstrom wird die Sensorkopfspule erregt, wodurch sich infolge des Durchflutungssatzes (Gl.3-1) ein Magnetfeld im Ferritkern ausbildet und durch den Schalenkern so geführt und gerichtet wird, dass es nur an einer Seite aus dem Kern austreten kann (Bild 3-5). Dies ist die aktive Fläche des Näherungssensors.



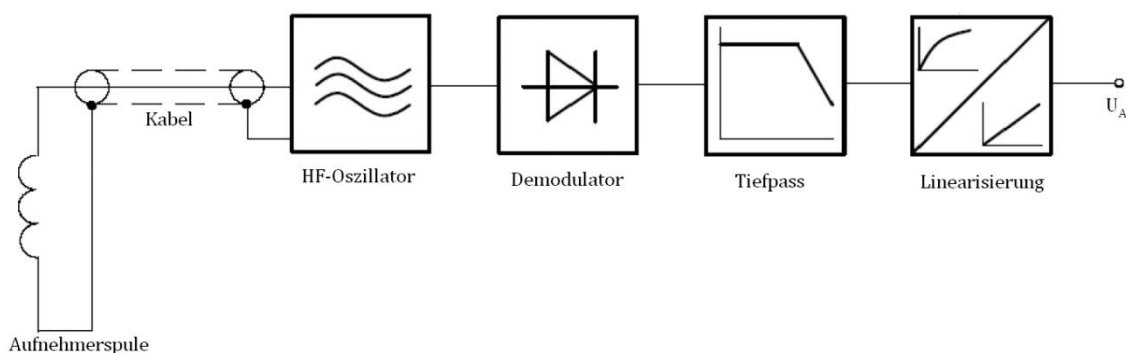
**Bild 3-5: Simulationsmodell Wirbelstromsensor**

Befindet sich in der Nähe dieser aktiven Fläche ein Messobjekt aus elektrisch leitendem Material, so wird dieses Messobjekt von dem zeitveränderlichen Magnetfeld der Spule durchdrungen. Der Abstand zwischen Messobjekt und aktiver Fläche des Sensors stellt dabei den zu messenden Abstand dar. Aufgrund des Induktionsgesetzes (Kap. 3.1.2) wird in dem elektrisch leitenden Material des Messobjektes ein Wirbelstrom induziert, der wiederum ein Magnetfeld um sich herum zur Folge hat, das nach der Lenz'schen Regel seiner Ursache entgegen wirkt und das Magnetfeld der Sensorspule schwächt bzw. dämpft. Diese Magnetfelddämpfung bewirkt eine Impedanzänderung der Spule, welche durch die kontinuierliche Messung der Spulengüte erfasst wird [7, S.9].

$$Q_L = \frac{\omega \cdot L}{R_S} \quad (\text{Gl.3-3})$$



Das primäre Sensorelement wird in einen Parallelresonanzkreis eingegliedert, um eine zuverlässige Messung der Güte und die Auswertung ihrer Abstandsabhängigkeit zu gewährleisten. Der Schwingkondensator ist dabei ein hochwertiges Bauelement mit minimalen Verlusten. Erregt wird dieser Schwingkreis mit einem speziellen Oszillator mit negativem Eingangswiderstand, um bei seiner Resonanzfrequenz, welche der Sensorarbeitsfrequenz entspricht, betrieben werden zu können. Ein weiteres charakteristisches Merkmal für diesen Oszillator ist, dass auf die Spulenzapfung verzichtet werden kann, indem die Mitkopplung auf elektronischem Wege realisiert wird. Dies hat wiederum den Vorteil, dass zwischen Oszillator und Schwingkreis nur eine zweiadrige Verbindung notwendig ist. Die Auswertung und Umwandlung des von der Güte des Sensorelements abhängigen sinusförmigen Oszillatorausgangssignals in eine Gleichspannung, wird von dem so genannten Konverter übernommen. In diesem Konverter befinden sich auch der Oszillator sowie ein Präzisionsgleichrichter und ein Linearisierungsschaltkreis. Die Linearisierung kompensiert nach [7, S.12-13] „die annähernd invers exponentielle Abhängigkeit der Güte vom zu messenden Abstand unter Benutzung eines abgestimmten spezifischen Gradienten des Erregungsstromes für die Sensorspule.“ Somit wird die lineare Abhängigkeit zwischen dem Oszillatorausgangssignal und dem Abstand zum Messobjekt erreicht. Der prinzipielle Aufbau eines Wirbelstrommesssystems ist in Bild 3-6 dargestellt [7, S.11-13].



**Bild 3-6: prinzipieller Aufbau eines Wirbelstrommesssystems [1, S.17]**

Bei einem Abstandsbereich von nahezu null bis über den halben Spulenkerndurchmesser weisen derartige Wirbelstromsensoren einen sehr geringen Linearitätsfehler auf. Ist der Abstand zum Messobjekt größer als der

halbe Sensorkopfdurchmesser, haben die Wirbelströme nur noch eine niedrige Wirkung auf das Sensormagnetfeld. Bei kleineren Abständen wird der Effekt deutlich verbessert, wodurch sich ein maximaler Messbereich des Wirbelstromsensors auf den halben Sensorkopfdurchmesser beschränkt. Wird ein größerer Messbereich verlangt, muss ein dementsprechend größerer Sensorkopf in Kauf genommen werden. Eine weitere Einschränkung ist, dass der Nahbereich des Sensors nicht erfasst bzw. nicht ausgewertet wird, da in dem Abstandsbereich von 0 - 0,4 mm, je nach maximalem Messbereich, die Schwingung des Resonanzkreises abreißen kann. Des Weiteren sollte die Detektionsfläche des Messobjektes mindestens um den Faktor 2 größer als der Sensordurchmesser sein. Da die Sensorspule Teil eines hochfrequenten Schwingkreises ist, müssen Wirbelstromsensoren mit dazu gehörigem Konverter und Kabel beim Hersteller kalibriert werden. Dadurch ist die Kabellänge des Sensors festgelegt und sollte nicht nachträglich zurechtgeschnitten werden, da das Kabel einen Teil des Schwingkreises darstellt und somit die Funktion des Sensors nicht mehr gewährleistet wäre. Zudem ist zusätzlich ein individueller Abgleich und eine ebenso individuelle Temperaturkompensation erforderlich, da die Beziehung zwischen Objektdistanz und Resonanzkreisspannung Bauteiltoleranzen und Temperaturdrift unterliegt [7, S.10] [8].

Um die oben genannten Probleme mit Wirbelstromsensoren zu umgehen, werden auch diese ständig weiter entwickelt. Somit soll zum Beispiel die neue Generation von Wirbelstromsensoren der Firma WayCon durch den Einsatz eines Mikroprozessors im Konverter völlig frei von diesen Problemen sein, wie es im folgenden Auszug aus dem Fachbericht zu lesen ist [8]: „Dadurch wird ermöglicht, nur bestimmte Spektralanteile innerhalb einer eng begrenzten Bandbreite zu verarbeiten und Störungen aus anderen Spektralbereichen auszufiltern. Zudem kompensiert diese Anordnung den inneren Verlustwiderstand der Spule, so dass die Schwingung auch bei Berührung von Spule und Messobjekt nicht abreißen kann. Demzufolge ist der bei herkömmlichen Sensoren nicht nutzbare Nahbereich jetzt Teil des Messbereichs. Im Gegensatz dazu wird bei größeren Abständen die Bedämpfung des Resonanzkreises durch den Innenwiderstand des Verstärkers ausgeglichen. Dies wirkt sich besonders dann sehr vorteilhaft aus, wenn bewegliche Teile wie z.B. Hydraulikzylinder, rotierende oder schwingende Teile,

den Messbereich teilweise oder vollständig verlassen. Der Messbereich ist somit um den Nahbereich als auch im Gesamtbereich erweitert und reicht bis hin zum Spulendurchmesser des Sensors. Durch die prozessorgeführte Oszillation werden unterschiedliche Kabellängen zwischen Elektronik und Sensor weitgehend kompensiert und ein Abgleich Sensor-Kabel-Elektronik hinfällig.“

Die technischen Daten eines Wirbelstrommesssystems sind nach [1, S.17]:

- Trägerfrequenz: 1,2 MHz
- Statischer Übertragungsfaktor: 7,87 V/mm
- Messbereich (für Magnetlager): 0,24 ... 2,15 mm
- -3-dB-Grenzfrequenz des Messsignals: 25 kHz
- Verzögerungszeitkonstante: 7  $\mu$ s

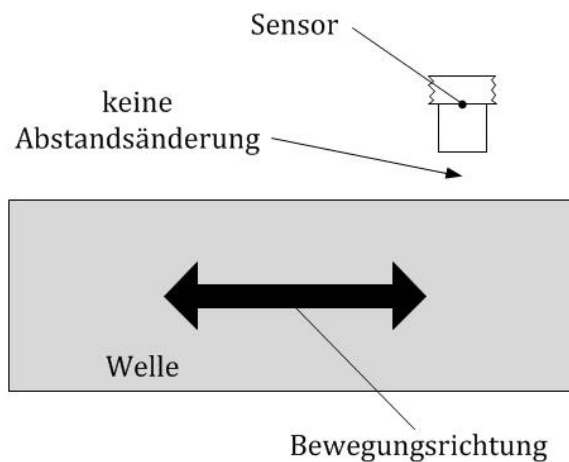
## 4. Alternative Messsystemanordnungen

### 4.1 Vorbetrachtungen

Ausgangspunkt für die Aufgabenstellung und Zielsetzung des vorliegenden Bakkalaureates ist ein Kundenprojekt, in dem ein Magnetlagersystem zu realisieren ist, welches eine mechanische Welle lagern und dabei eine hohe Drehzahl erreichen soll. Damit die Verluste bei der hohen Drehzahl möglichst klein bleiben, muss auch der letzte Reibungsverlust minimiert werden, die Luftreibung. Dazu wird der Rotor mittels einer Hülse gekapselt im Vakuum betrieben. Da diese Hülse nicht durchsichtig ist, kann kein optisches Messsystem zum Einsatz kommen. Ein für axiale Magnetlager üblicher Wirbelstromsensor als Abstandsmesser an der Stirnseite der Welle ist ebenfalls nicht möglich, da die eine Stirnseite konstruktionsbedingt mit dem Axiallager belegt ist und die andere Stirnseite für den Kunden frei bleiben muss. Kapazitive Messsysteme werden nicht verwendet, da der Temperaturdrift des Dielektrikums bei Magnetlagersystemen schwer zu beherrschen ist. Somit wird ein für diesen Fall spezielles induktives Messsystem entwickelt, wo die Messspulen in Form eines Radiallagers um die Welle herum angeordnet werden. So kann über einen schmalen Ring anderen Materiales, der an der Stelle des induktiven Messringes in den Rotor integriert ist, die axiale Lage erfasst werden. Doch aufgrund der bei der hohen Drehzahl entstehenden Wärme und der damit verbundenen Temperaturerhöhung, erweist sich das induktive Messsystem infolge des eigenen Temperaturdrifts und der hohen Empfindlichkeit gegenüber dem elektromagnetischen Feld der Magnetlager als unzuverlässig. Somit muss ein alternatives Messsystem erörtert werden um die axiale Lageerfassung weiterhin zu ermöglichen. Aufgrund der positiven Firmenerfahrung mit Wirbelstromsensoren sollen diese in einer alternativen Messanordnung untersucht werden.

Da der Wirbelstromsensor nicht an der Stirnseite positioniert werden kann, kann er nur in radialer Richtung zur Welle, also rechtwinklig zur messenden axialen Richtung, montiert werden. Bei dieser Montageposition wird aber der Sensor bei einer normalen zylindrischen Messspur keine Abstandsänderung bei axialer

Verschiebung wahrnehmen (Bild 4-1). Um dies aber zu erreichen, muss die Welle an der Messspur verändert werden.



**Bild 4-1: schematische Problemdarstellung**

Die Abstandsänderung zum Wirbelstromsensor kann dabei auf zwei Varianten herbei geführt werden. Zum einen kann die axiale Verschiebung über einer Kante gemessen werden und andererseits über einer schiefen Ebene bzw. im rotationssymmetrischen Sinn über einem Konus. Diese zwei Varianten werden messtechnisch untersucht und im nächsten Kapitel ausgewertet. Der bei den folgenden Untersuchungen verwendete Sensor ist ein Wirbelstromsensor des Typs TQ402 der Firma vibro-meter mit einem Messbereich von 4 mm (0,4 - 4,4 mm) und einer Empfindlichkeit von 4 mV/μm bei einem Sensorkopfdurchmesser von 8,2 mm.

Um eine Messsystemanordnung für die axiale Lageerfassung verwenden zu können, muss dessen Messsignal proportional zur axialen Wegänderung sein, also eine gewisse Linearität besitzen. Diese Linearität wird anhand einer Sollwertgeraden für jeden Messsignalverlauf bewertet. Die Gerade wird dabei aus dem ersten und letzten Messpunkt der jeweiligen Messreihe mit folgender Gleichung bestimmt:

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) \quad (\text{Gl. 4-1})$$

Anhand der erhaltenen Geradengleichung werden dann die äquivalenten Signalspannungen  $U_r$  der Sollwertgeraden zu den vergleichenden

Messsignalspannungen  $U_S$  berechnet. Die relative Abweichung der einzelnen Messsignalspannungen der aufgenommenen Messreihe zu den berechneten Signalspannungen der Sollwertgeraden ist dann das Maß, mit dem die Linearität bewertet wird. Für die Berechnung der prozentualen Abweichung gilt:

$$A_{rel} = \left( 1 - \left( \frac{U_S}{U_r} \right) \right) \cdot (-100) \quad (\text{Gl.4-2})$$

Aufgrund der Multiplikation mit "-100" wird erreicht, dass das Vorzeichen der prozentualen Abweichung angibt, ob der abweichende Messwert oberhalb oder unterhalb der Sollwertgeraden liegt. Ein positives Vorzeichen steht dabei für oberhalb und ein negatives für unterhalb. Für einen linearen Messsignalverlauf sollte die relative Abweichung unter  $\pm 3 \%$  liegen.

## 4.2 Messuntersuchungen

### 4.2.1 Messanordnung Kante im Vergleich zur schiefen Ebene

Bei dem Vergleich Messanordnung Kante zur schiefen Ebene werden zwei unterschiedliche Winkel für die schiefe Ebene verwendet. Diese zwei Winkel werden von der Konstruktion des Kundenprojektes vorgegeben bzw. durch dieses bei der Auswahl der Winkel begrenzt. Eine Skizze der Konstruktionsproblematik ist im Bild 4-2 dargestellt.

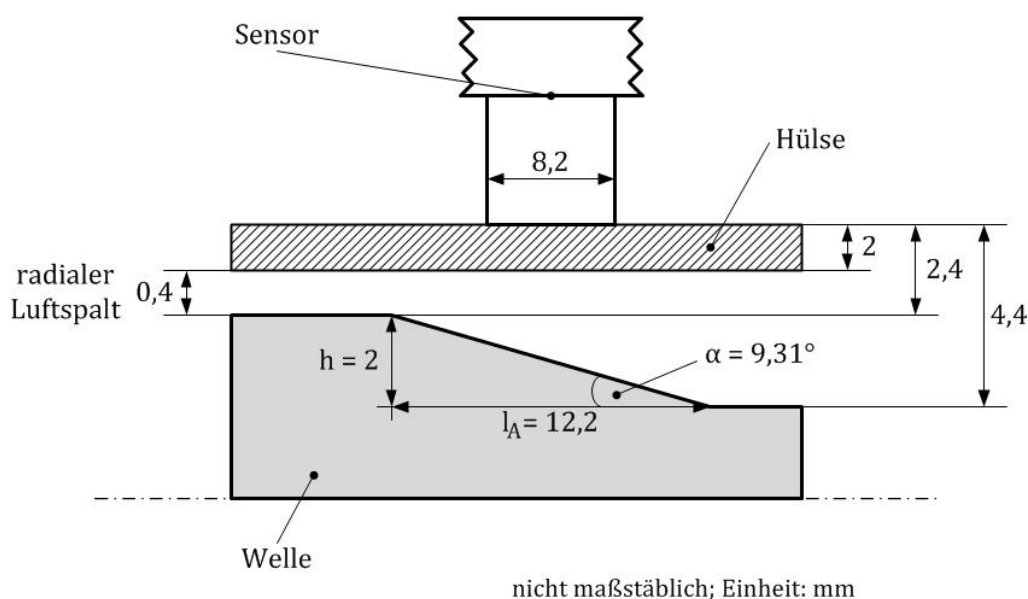
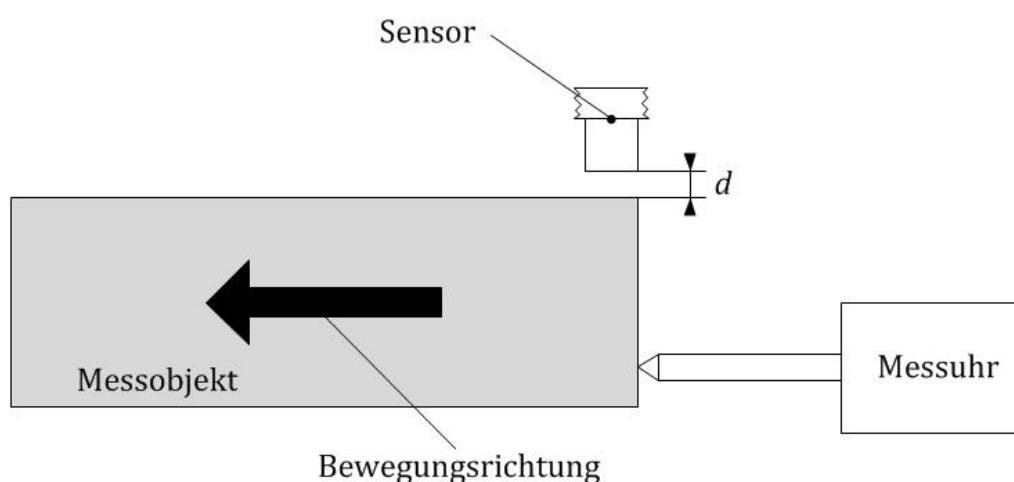


Bild 4-2: Skizze der Konstruktionsproblematik

Aus dieser Konstruktionsskizze ist ersichtlich, dass ein maximaler Höhenunterschied  $h$  von 2 mm für die schiefe Ebene möglich ist. Die Ankathetenlänge der schiefen Ebene  $l_A$  liegt dabei aufgrund des Sensorkopfdurchmessers von 8,2 mm einem maximalen Axiallagerspiel von  $\pm 1$  mm und einer Montagetoleranz für den Sensor von nochmal  $\pm 1$  mm, bei 12,2 mm. Somit ergibt sich nach der Gleichung  $\tan \alpha = h/l_A$  ein maximaler Winkel von  $9,31^\circ$ . Um für den Sensor eine kleine Toleranz im Abstand zum Rotor zu gewinnen, wird auch ein Winkel von  $5^\circ$  untersucht.

### **Messreihe Kante**

Der Sensor wird senkrecht zur Grundplatte über einer Stahlkante in einem Abstand  $d$  von ca. 1,0 mm montiert. Dabei steht der Sensor fest. Während des Versuches wird die Kante immer um 0,1 mm in axialer Richtung verschoben und der entsprechende Signalspannungswert aufgenommen. Die Wegänderung wird dabei mit einer Messuhr und der Spannungswert mit einem Digitalmultimeter gemessen. Die Richtung der axialen Bewegung ist so definiert, dass der Sensorkopf immer weiter über der Kante überstehen wird (Bild 4-3). Der gesamte Verfahrensweg in axialer Richtung ist dabei entsprechend dem Durchmesser des Sensorkopfes auf 8 mm begrenzt, da der Sensor in dieser Position sich nicht mehr über dem Messobjekt befindet und es somit nicht mehr wahrnehmen sollte.



**Bild 4-3: Versuchsaufbau und Startposition der Messreihe Kante**

**Messreihe Schräge 10°**

Auch bei der Messreihe Schräge 10° wird der Sensor in einem Winkel von ca. 90° zur Grundplatte fest montiert. Unter dem Sensor wird eine Messplatte aus Stahl in einem Winkel von 10° zur Grundplatte gelegt. Der Abstand  $d$  zwischen Sensorkopf und Messplatte wird dabei anfangs auf 1,0 mm eingestellt. Im Versuch wird dann die Messplatte immer um 0,1 mm vom Sensor in axialer Richtung weg bewegt, so dass sich der Abstand zwischen Sensor und Messplatte immer mehr vergrößert (Bild 4-4). Der Signalspannungswert wird dabei auch wieder alle 0,1 mm aufgenommen. Um die Signale miteinander vergleichen zu können, soll auch hier der gesamte Verfahrensweg 8 mm betragen.

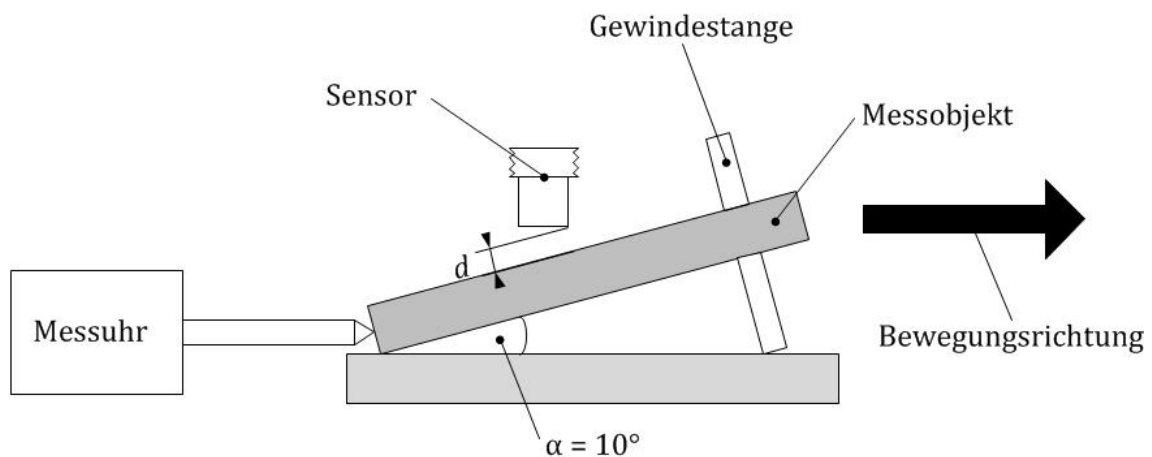


Bild 4-4: prinzipieller Aufbau der Messreihe 10°

**Messreihe Schräge 5°**

Der Versuchsaufbau ist analog zur Messreihe Schräge 10°. Es wird lediglich der Winkel der Messplatte zur Grundplatte auf 5° eingestellt.

**Ergebnisse**

Die Ergebnisse sind in den Bildern 4-5 und 4-6 anschaulich dargestellt. Dabei fällt auf, dass der gesamte Verfahrensweg anstatt der geplanten 8 mm, 8,5 mm beträgt. Der Grund dafür ist der hohe Messbereich des Sensors von 4 mm. Da der Abstand zum Messobjekt Kante nur 1 mm beträgt, was innerhalb des ersten Viertels des Sensormessbereiches liegt, kann der Sensor die Kante auch noch bei einem Verfahrensweg von 8,4 mm wahrnehmen. Ab 8,5 mm wird dann allerdings nur noch die maximale Signalspannung angezeigt.



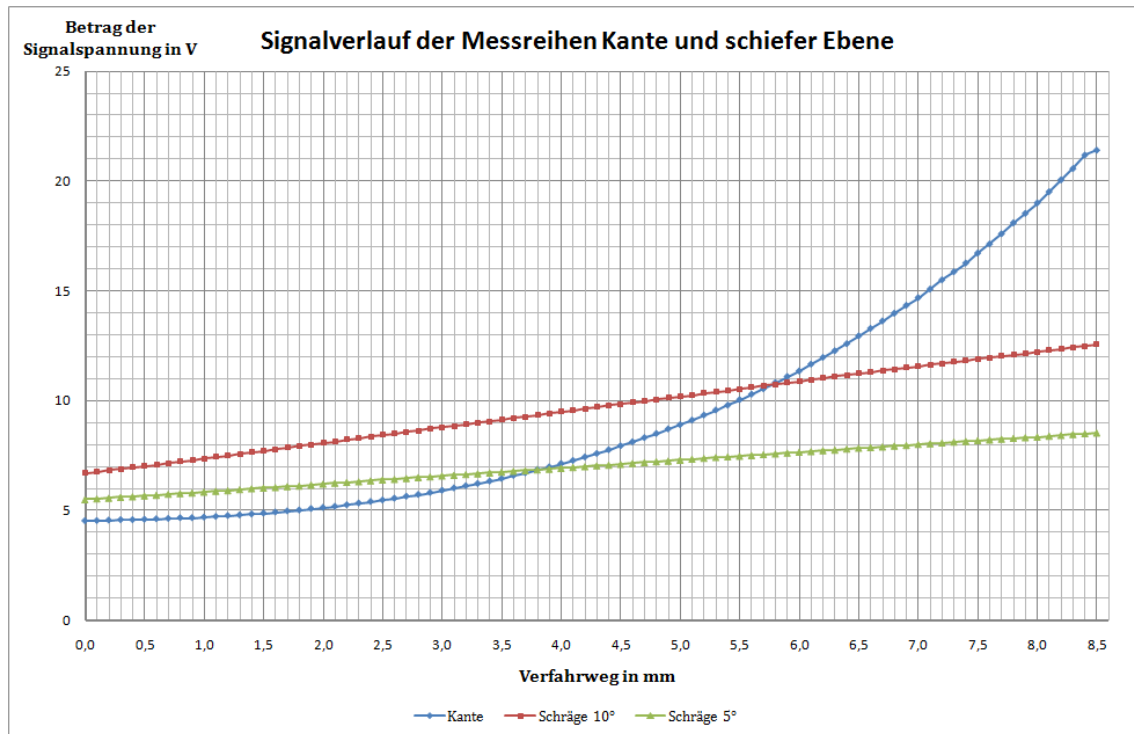


Bild 4-5: Signalverlauf der Messreihen Kante und schiefer Ebene

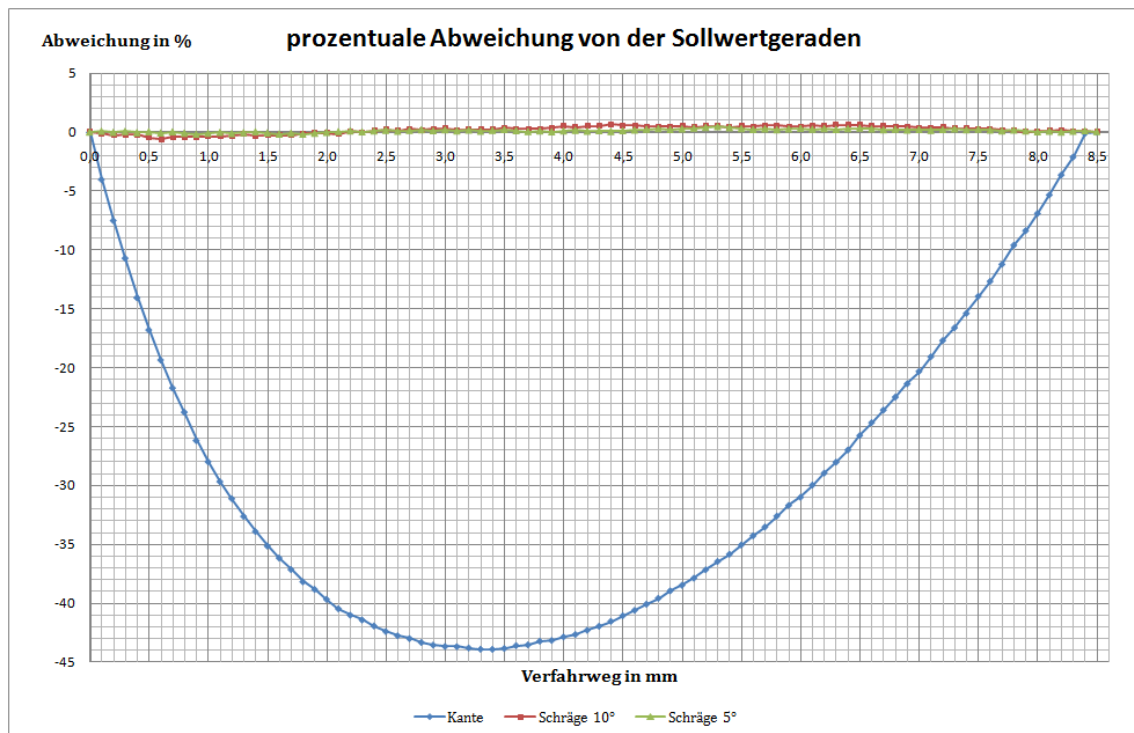


Bild 4-6: prozentuale Abweichung von der Sollwertgeraden

Die Messreihe Kante weist einen deutlichen nichtlinearen Verlauf des Messsignales auf und ist somit für eine Axialmessung nicht geeignet.

Der Signalverlauf der Messreihen Schräge 10° und Schräge 5° ist dagegen nahezu linear. Die Abweichungen der einzelnen Messwerte zur jeweiligen Sollgeraden liegen dabei unter 1 %.

Der Übertragungsfaktor der Schräge mit 10° Winkel liegt im Mittel bei 0,688 V/mm und bei der Messreihe Schräge 5° bei 0,356 V/mm.

Aufgrund des besseren Übertragungsfaktors ist die schiefe Ebene mit 10° der schiefen Ebene mit 5° Winkel vorzuziehen, da ein hoher Übertragungsfaktor unempfindlicher beim aufbereiten des Signales gegenüber Störungen ist, nähere Erläuterungen dazu im Kapitel 5.

#### **4.2.2 Schiefe Ebene in Abhängigkeit vom Winkel**

Im vorherigen Kapitel ist schon ersichtlich geworden, dass die schiefe Ebene mit 10° Winkel einen fast doppelt so hohen Übertragungsfaktor hat wie die Schräge mit 5° Winkel und das alles bei einer nahezu identischen Linearität. Je größer also der Winkel ist, desto größer wird der messbare Abstandsunterschied zwischen Sensor und schiefer Ebene bei axialer Verschiebung, wodurch der Übertragungsfaktor steigt. Doch wie sieht es im Zusammenhang mit der Linearität aus? Bis zu welchem Winkel bleibt der Übertragungsfaktor konstant? Diese Frage wird hier im folgenden Kapitel genauer untersucht. Dazu wird wieder eine Messplatte aus Stahl, wie im Kapitel 4.2.1 "Messreihe Schräge 10°", mit unterschiedlichen Winkeln unter dem Sensor platziert. Die Messsignalverläufe sind in Bild 4-7 und die relative Abweichung in Bild 4-8 dargestellt.

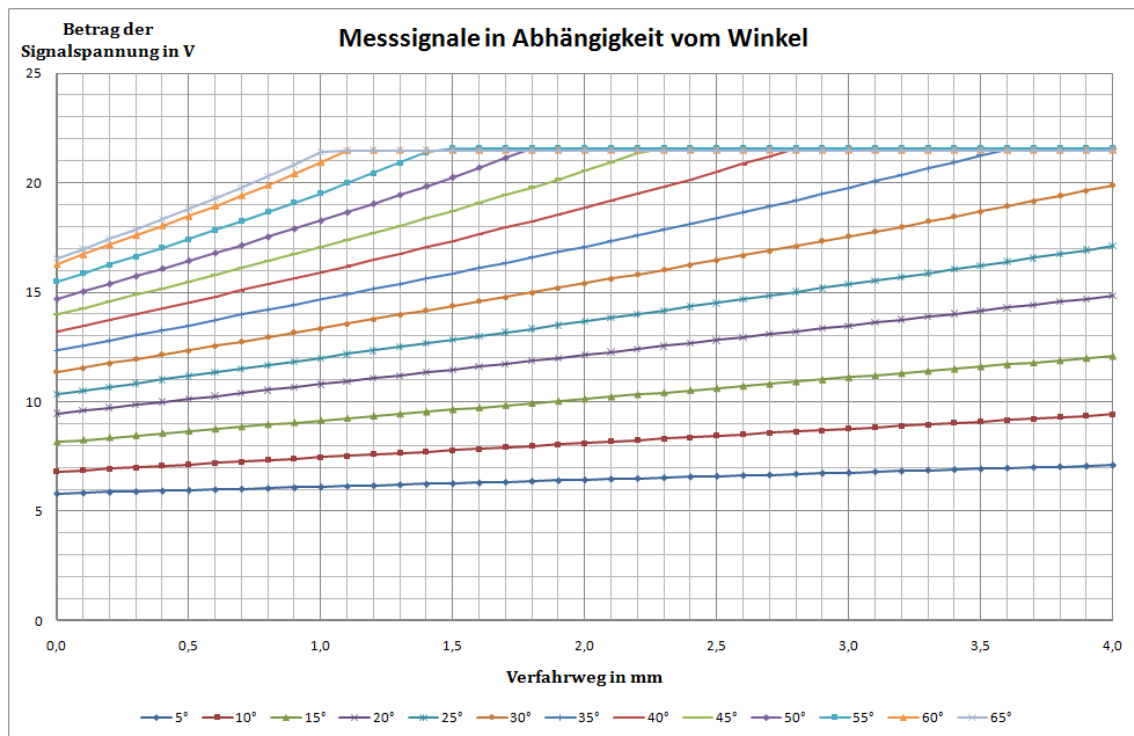


Bild 4-7: Signalverläufe in Abhängigkeit vom Winkel

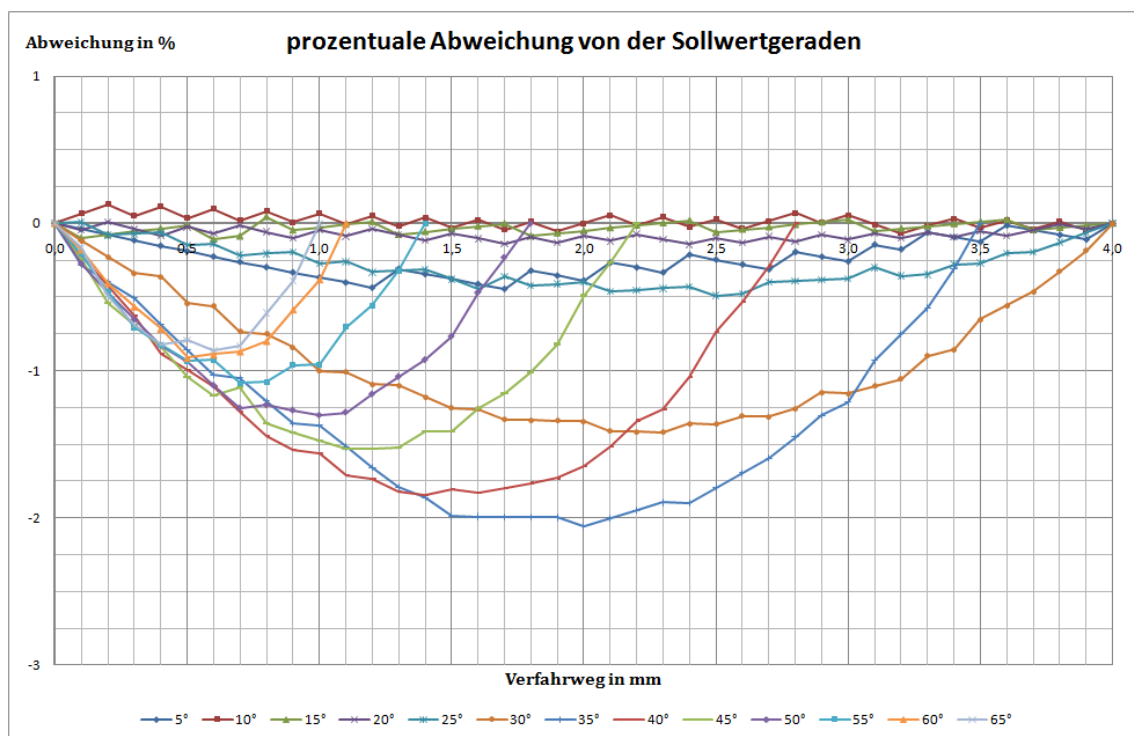


Bild 4-8: relative Abweichung in Winkelabhängigkeit

Die Messsignalverläufe der einzelnen Messreihen beweisen in Bild 4-7 deutlich, dass mit steigendem Winkel auch der Anstieg der Sollwertgeraden bzw. der Übertragungsfaktor größer wird und zwar wie folgt:

• 5°	0,323 V/mm
• 10°	0,655 V/mm
• 15°	0,983 V/mm
• 20°	1,345 V/mm
• 25°	1,693 V/mm
• 30°	2,135 V/mm
• 35°	2,554 V/mm
• 40°	2,993 V/mm
• 45°	3,345 V/mm
• 50°	3,811 V/mm
• 55°	4,229 V/mm
• 60°	4,7 V/mm
• 65°	4,88 V/mm

Charakteristisch ist auch, dass der axiale Messbereich über der schiefen Ebene mit steigendem Winkel stark verkleinert wird. Genauso steigt die Nichtlinearität an, was bei den größeren Winkeln schon mit bloßem Auge zu erkennen ist, doch sie setzt bereits viel früher ein. Ab einem Winkel von 30° bildet sich eine deutliche Nichtlinearität ab, was im Bild 4-8 in Form einer Parabelbildung zu sehen ist. Dabei liegt die relative Abweichung für diesen Winkel bei maximal 1,4 %. Bei 35° liegt sie schon bei 2% und steigt mit zunehmendem Winkel weiter an, auch wenn es dem Anschein nach im Bild 4-8 nicht so aussieht. Dieser Eindruck täuscht. Der Grund dafür ist, dass mit zunehmendem Winkel der axiale Messbereich kleiner wird und somit die Berechnung der Sollwertgeraden und deren Auswertung über einen kleineren Bereich stattfindet. Dadurch erzeugt die Nichtlinearität scheinbar kleinere Abweichungen. Wäre der Signalverlauf der größeren Winkel über den vollen Messbereich von 4mm messbar, würden auch die Abweichungen mit steigendem Winkel größer werden. Als bester Kompromiss zwischen hohem Übertragungsfaktor und geringer Nichtlinearität ist die schiefe Ebene mit einem

Winkel von  $25^\circ$  zu empfehlen, da die Parabel der prozentualen Abweichung da noch am kleinsten ist.

#### 4.2.3 Modellwelle mit Konus bei unterschiedlicher Drehzahl

Zu weiteren Untersuchungen wird eine Modellwelle erstellt, die der Konstruktionsbedingung im Kapitel 4.2.1 entspricht. Dazu wird ein Zylinder aus Stahl auf einem Konus von  $9,5^\circ$  und einer Ankathetenlänge von 12,2 mm abgedreht. Die dazugehörige Konstruktionszeichnung befindet sich im Anhang. Um die Messreihen bei unterschiedlicher Drehzahl aufnehmen zu können, wird die Modellwelle in eine kleine Drehbank eingespannt. Der Drehzahlbereich der Drehbank liegt bei 125 - 2000 U/min. Diese Untersuchung soll zeigen, ob es Unterschiede im Signalverlauf bei keiner, niedriger oder hoher Drehzahl gibt. Demzufolge wird die niedrigste und höchste Drehzahl der Drehbank dafür gewählt. Aus theoretischer Sicht sollte es keine Unterschiede des Messsignals im Drehzahlbereich geben. Die Ergebnisse sind im Bild 4-9 und 4-10 dargestellt.

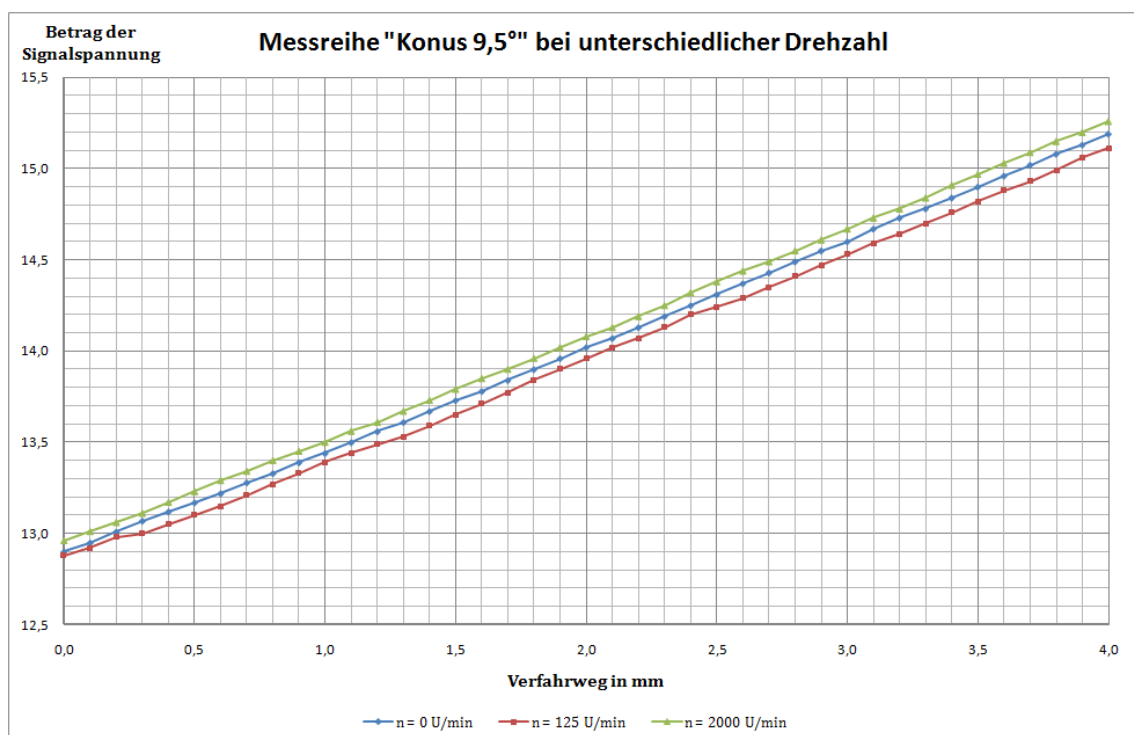


Bild 4-9: Messreihe Konus  $9,5^\circ$  bei unterschiedlicher Drehzahl

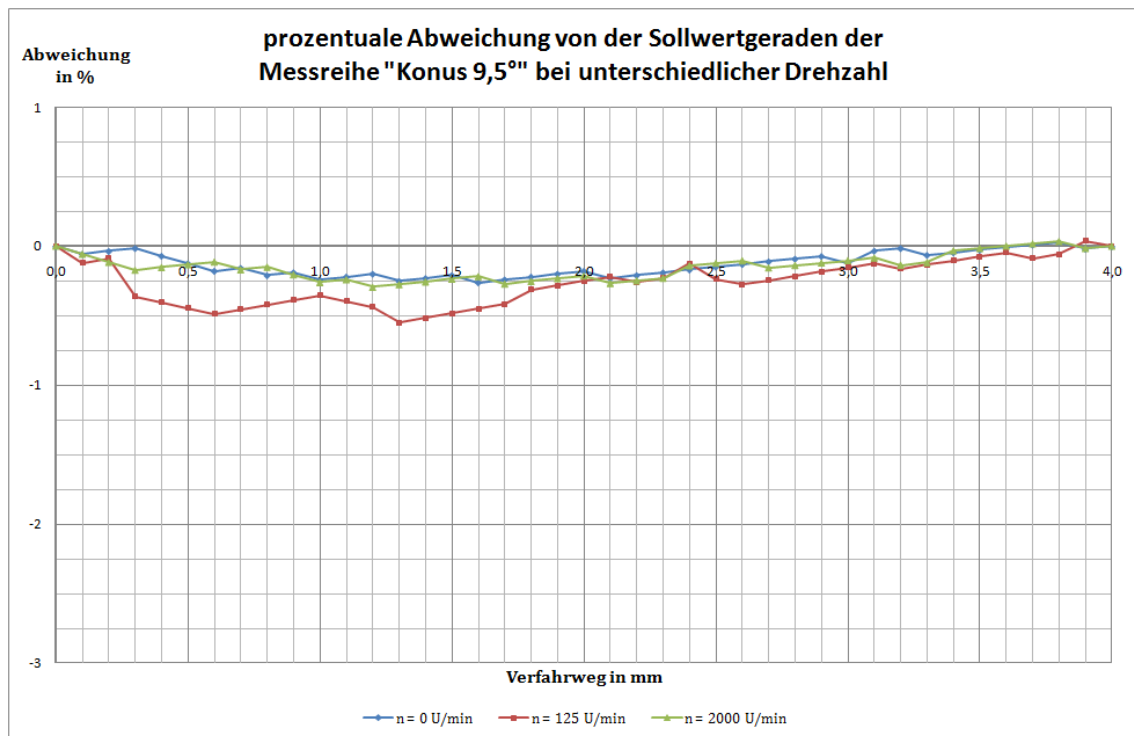


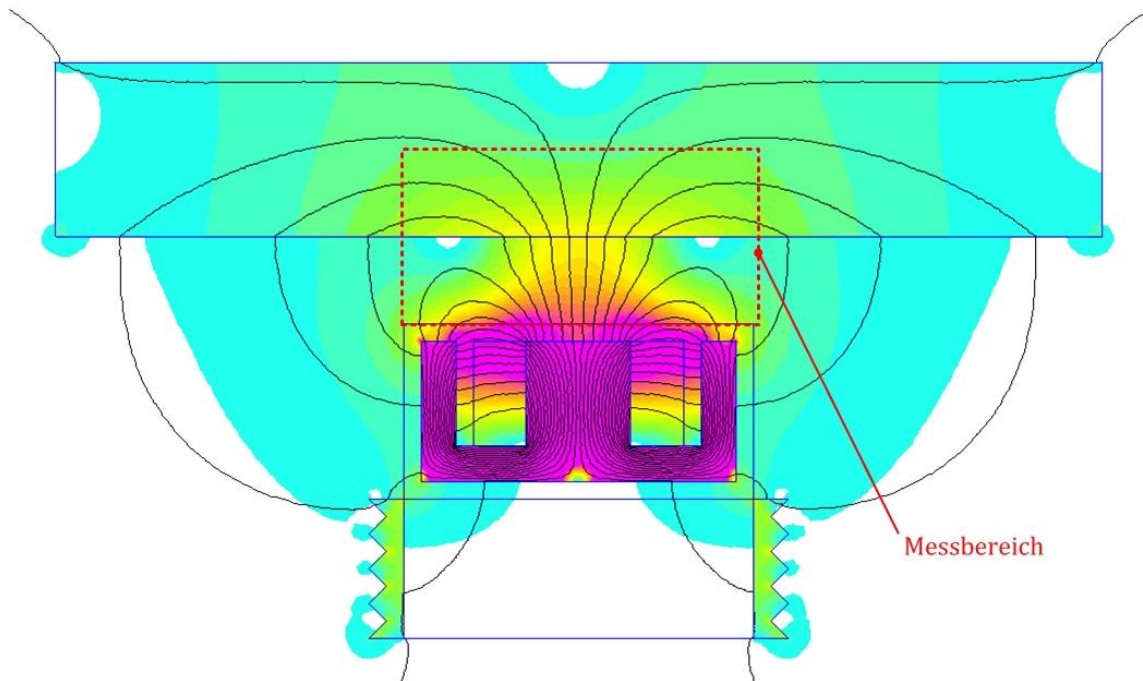
Bild 4-10: relative Abweichung der Messreihe Konus 9,5°

Wie in den Diagrammen zu sehen ist, wird die Theorie von der Praxis bestätigt. Es gibt keine gravierenden Unterschiede der Messsignale zur Drehzahl. Der prozentuale Unterschied zwischen den Messkurven im Bild 4-10 liegt bei ca. 0,25 % und ist in dieser Größenordnung nicht diskussionswürdig, da diese Schwankungen durch Messungenauigkeiten und/oder Ungenauigkeiten im Aufbau des Versuches hervorgerufen werden können.

### 4.3 Gründe der Nichtlinearität

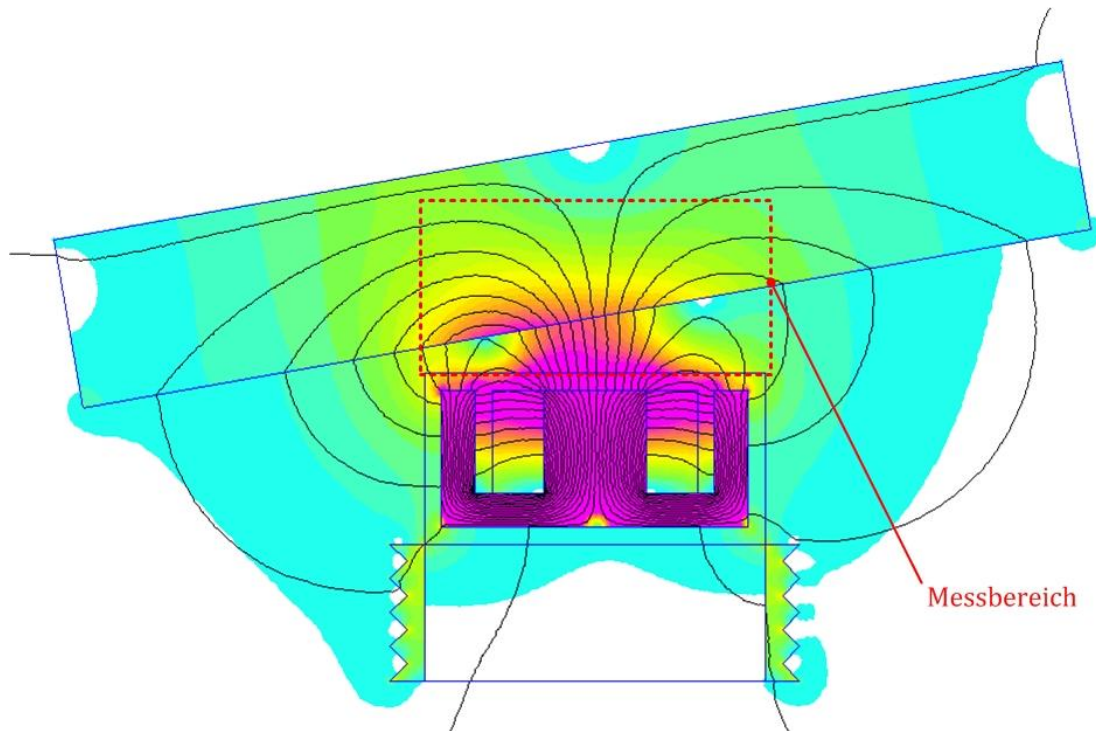
In den vorangegangenen Kapiteln wurde nachgewiesen, dass das Messsignal über einer Kante und bei einer schiefen Ebene bzw. Konus ab einem bestimmten Winkel einen deutlichen nichtlinearen Signalverlauf aufweist. Der Grund dafür wird in diesem Kapitel untersucht. Dazu werden verschiedene Sensoranordnungen mittels der Magnetfeldsimulationssoftware *FEMM* (*finite element method magnetics*) simuliert. Die gezeigten Simulationsbilder sollen dabei nur den Feldverlauf des Magnetfeldes darstellen und keine Aussage darüber liefern wie stark das Magnetfeld an welchem Punkt ist. Aus diesem Grund wird auch auf eine Legende der Farbabstufung verzichtet. Die schwarz dargestellten Linien bilden die

Magnetfeldlinien, während der farbliche Teil die magnetische Flussdichte repräsentiert.



**Bild 4-11: simulierte normale Abstandsmessung**

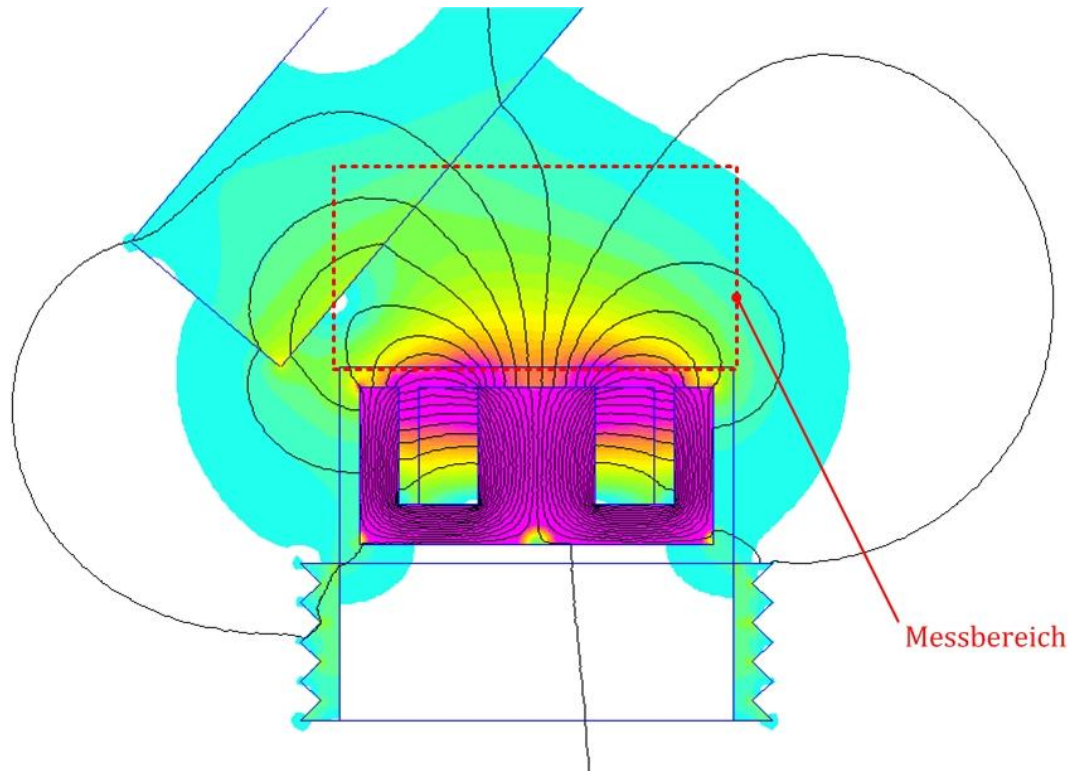
Die erste Anordnung zeigt in Bild 4-11, wie sich im Normalfall das Magnetfeld eines Wirbelstromsensors mit Messobjekt ausbildet. Dabei ist sehr schön die Symmetrie zu erkennen. Egal ob sich der Abstand des Messobjektes zum Sensor vergrößert oder verkleinert, die Symmetrie bleibt gleich. Auf diese Sensoranordnung hin wird der Wirbelstromsensor vom Hersteller kalibriert, d.h. der Konverter kann diesen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Spulengüte und Abstand linearisieren. Doch diese Linearisierung im Konverter hat auch einen Toleranzbereich, welcher mit den folgenden Anordnungen teilweise überschritten wird.



**Bild 4-12: simulierte Abstandsmessung bei einer Schräge von 10°**

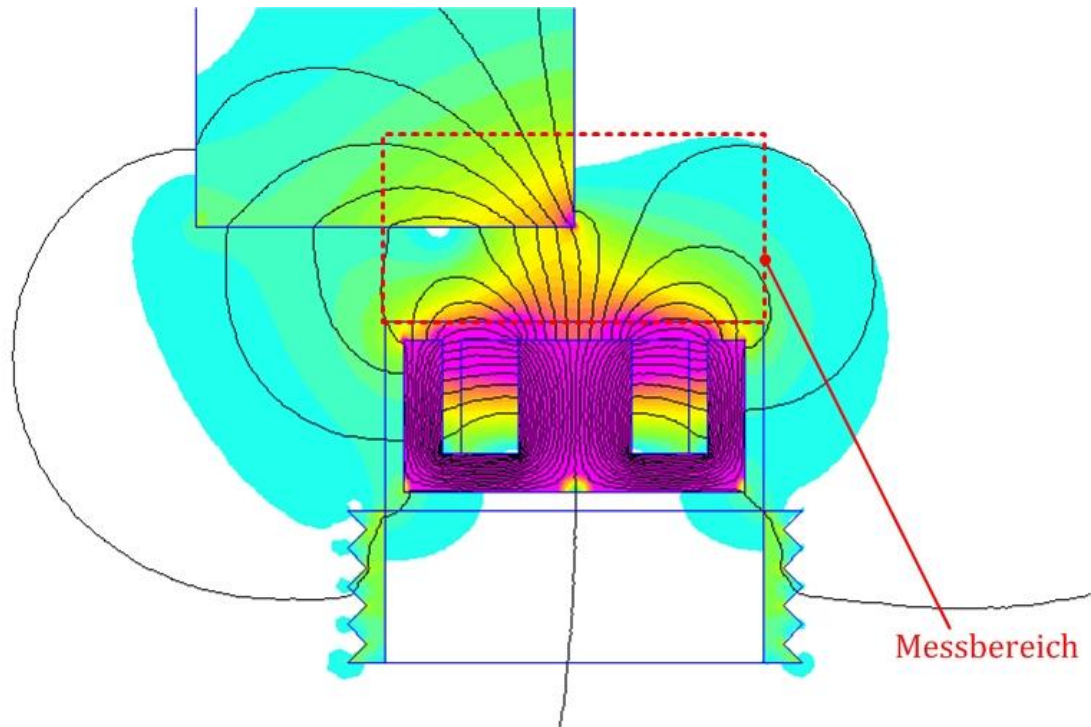
Im Bild 4-12 ist die Sensoranordnung einer schiefen Ebene mit einem Winkel von 10° zu sehen. Das Magnetfeld bildet sich dabei leicht asymmetrisch aus, was zur Folge hat, dass die Beziehung zwischen Spulengüte und Abstandsänderung noch viel nichtlinearer wird. Der Konverter kann aber diese Beziehung noch linearisieren, da der Toleranzbereich anscheinend noch nicht überschritten ist. Der Grund dafür ist, dass das Messobjekt sich noch komplett im Messbereich des Sensors befindet und somit noch komplett erfasst wird. Wird der Winkel weiter erhöht, so bilden sich immer mehr Feldlinien im linken Bereich der Schräge aus, wodurch die Nichtlinearität größer und der Toleranzbereich weiter überschritten wird. Die Überschreitung des Toleranzbereiches ist im Bild 4-8 an der Ausbildung der Parabel zu erkennen. Des Weiteren wird mit steigendem Winkel die schiefe Ebene nicht mehr komplett erfasst.





**Bild 4-13: simulierte Abstandsmessung bei einem Winkel von 50°**

Die schiefe Ebene im Winkel von 50° befindet sich nur noch teilweise im Erfassungsbereich des Wirbelstromsensors. Der Konverter kann mit seiner Werkseinstellung die vorhandene Nichtlinearität nicht mehr kompensieren. Genau das selbe tritt bei der Anordnung Kante ein, wobei die Kante mit ihrem abrupten Übergang von detektierbarem Messobjekt zu nicht erfassbaren Messobjekt ein Extrembeispiel darstellt, was im Bild 4-14 zu sehen ist.



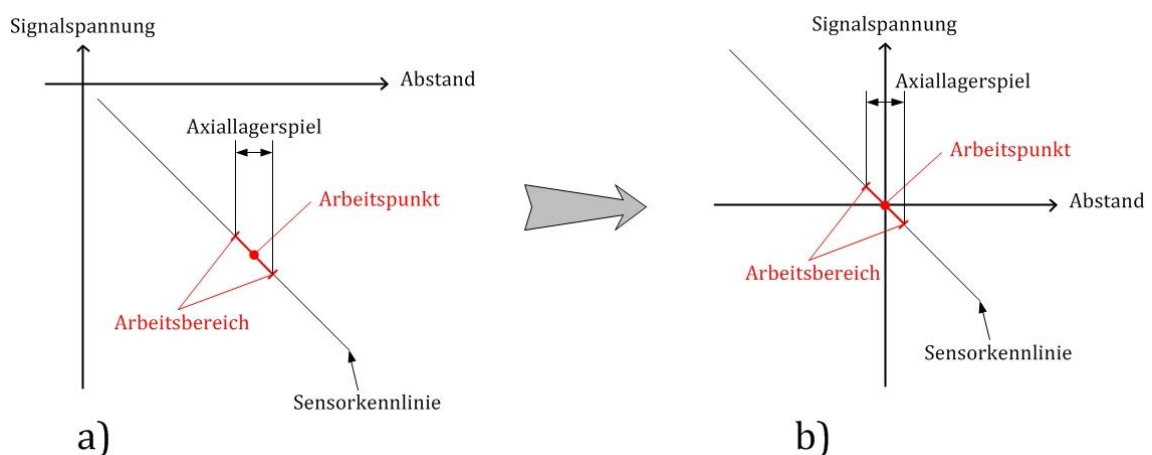
**Bild 4-14: simulierte Abstandsmessung an einer Kante**

Diese Sensoranordnungen könnten aber auch ein absolut lineares Messsignal liefern, indem der Konverter speziell auf diese Anordnungen hin kalibriert wird oder ein eigenes Wirbelstromsensormesssystem entwickelt wird oder in dem ein digitaler Konverter entwickelt bzw. verwendet wird um damit am PC zum Beispiel die Kennlinie verändern zu können.

## 5. Anwendung des Axialmesssystems Konus 9,5° an einer magnetisch gelagerten Welle

### 5.1 Vorbetrachtungen

Die Messsystemauswertungsplatine stellt die Schnittstelle zwischen den Sensoren und dem analogen Regler dar. Die Signale der Wirbelstromsensoren werden von ihr ausgewertet, aufbereitet und verstärkt an die Regelplatine weitergeleitet. Dabei muss das Messsignal für den Regler so angepasst werden, dass die Mittellage des Messsystems auch der Mittellage der Welle entspricht. Wird die Anpassung des Messsystems nicht vorgenommen, kann der Regler die Welle nicht korrekt um den Mittelpunkt ausregeln und das System wird instabil. Aufgrund der alternativen Messsystemanordnung für die axiale Lageerfassung muss für das Axiallager eine eigene, neue den Anforderungen entsprechende Auswertungsschaltung entworfen werden. Der verwendete Wirbelstromsensor gibt in Abhängigkeit vom Abstand ein dementsprechendes negatives Spannungssignal aus. Dies entspricht bei seinem Messbereich von 0,4 - 4,4 mm einer Spannung von ca. -1,8 – -21,6 V. Der Regler fordert aber ein Messsignal von  $\pm 4V$  für das dementsprechende positive oder negative Lagerspiel. Des Weiteren sollte das  $\pm 4V$  –Signal der gewünschten Lagermitte entsprechen. Um dies zu erreichen ist es notwendig, die negative Kennlinie des Sensors mit einer Offsetspannung so anzuheben, dass der Mittelpunkt des Sensorarbeitsbereiches am Axiallager dem Koordinatenursprung, also 0V, entspricht (Bild 5-1).



**Bild 5-1: Sensorkennlinie a) ohne Offset und b) mit Offset**

Zudem kommt hinzu, dass der Sensor seine Abstandsänderung über den Konus der Modellwelle misst und somit bei einem Axiallagerspiel von  $\pm 1\text{ mm}$  und einem Konuswinkel von  $9,5^\circ$  nur eine maximale Abstandsänderung von  $\pm 0,1673\text{ mm}$  erfasst. Diese Abstandsänderung entspricht bei einer vom Hersteller angegebenen Empfindlichkeit von  $4\text{ mV}/\mu\text{m}$  einer Signalspannungsänderung von  $\pm 0,6694\text{ V}$ . Um diese Signalspannungsänderung auf den geforderten  $\pm 4\text{ V}$ -Pegel zu bekommen, ist eine 6-fache Verstärkung des Messsignales erforderlich. Da der Sensor die Abstandsänderung in radialer Richtung misst, kann es bei einer radialen Verschiebung der Welle zu einem Messfehler bzw. einer Fehlinterpretation der Abstandsänderung kommen. Aus diesem Grund müssen für die axiale Lageerfassung an einem Konus mehrere Wirbelstromsensoren eingesetzt werden. Ist der Rotordurchmesser sehr viel größer als der Sensorkopfdurchmesser, so müssen nur zwei Sensoren eingesetzt werden. Ist dies nicht der Fall, müssen drei oder vier Sensoren eingesetzt werden um die radialen Verschiebungen zu kompensieren. Im Beispiel der verwendeten Modellwelle genügen zwei Wirbelstromsensoren, da die Modellwelle mit einem Durchmesser von  $70\text{ mm}$  ausreichend groß ist und somit die radiale Verschiebung in y-Richtung von maximal  $\pm 0,75\text{ mm}$  keine Messfehler verursacht (Bild 5-2).

Die Verschiebung in x-Richtung wird dagegen von den zwei Sensoren gegenüberliegender Anordnung kompensiert. Dazu werden die Messsignale der einzelnen Sensoren durch die Messsystemauswertungsschaltung zu einem Signal addiert. Somit ist garantiert, dass nur eine axiale Lageänderung eine Spannungsdifferenz am Ausgang der Auswerteschaltung zur Folge hat.

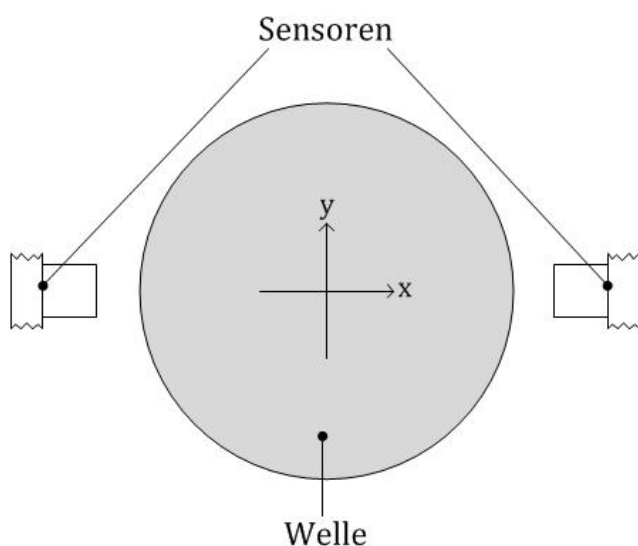
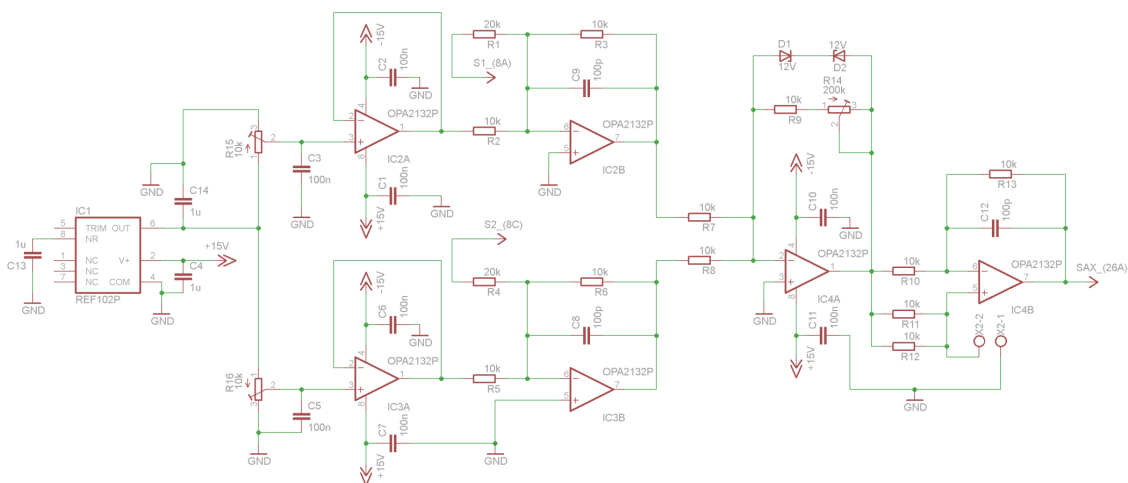


Bild 5-2: Lageanordnung mit 2 Sensoren

## 5.2 Messsystemauswerteschaltung

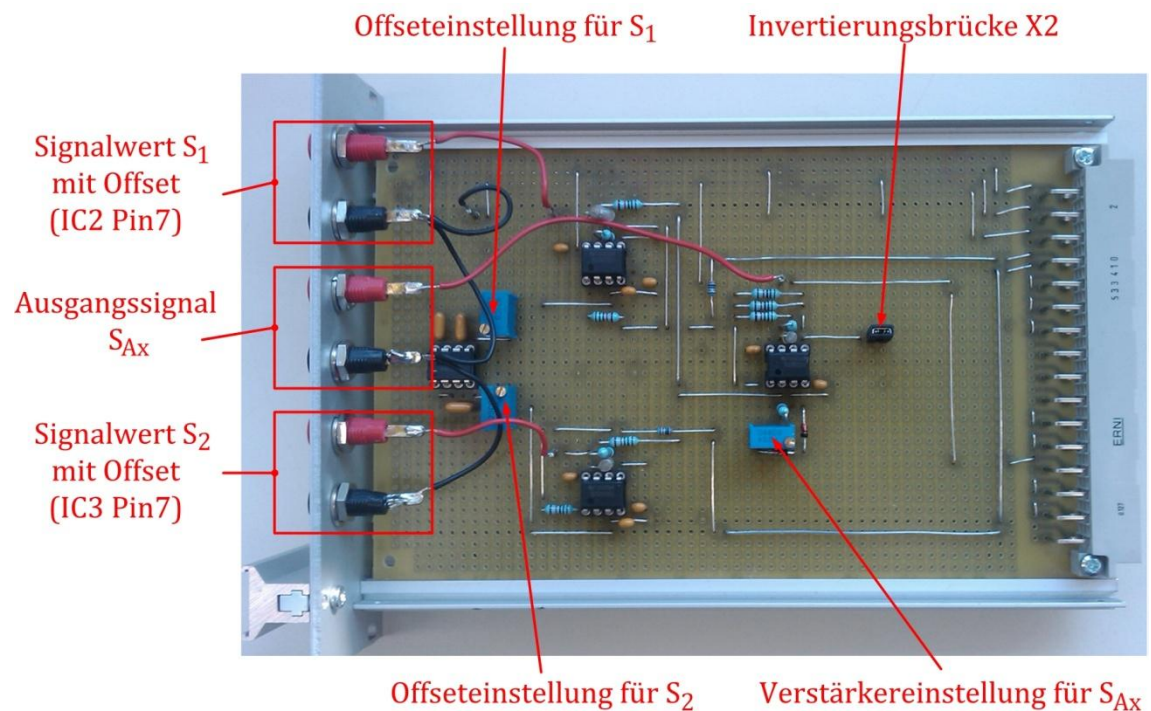
Der Schaltplan zur Auswerteschaltung ist im Bild 5-3 dargestellt. Der erste Schaltkreis IC1 ist eine Referenzspannungsquelle, die eine konstante Spannung von exakt 10 V bereitstellt. Mit dieser Spannung werden die beiden Sensorsignale  $S_1$  und  $S_2$  über die jeweiligen Potentiometer R15 bzw. R16 mit dem notwendigen Offset beaufschlagt. Der darauf folgende Operationsverstärker, ab sofort mit OPV bezeichnet, IC2A bzw. IC3A dient als Impedanzwandler, auch Spannungsfolger genannt, um die Offsetspannung als unbelastete Quelle bereit zu stellen. Bei dem zweiten OPV des Schaltkreises IC2 bzw. IC3 wird der Signalwert  $S_1$  bzw.  $S_2$  mit dem entsprechenden Offsetwert addiert. Vor dieser Addition werden die Sensorsignale allerdings halbiert, damit die maximale Offsetspannung von 10 V auch ausreicht um einen hohen Signalgrundwert von ca. -20 V zu kompensieren (siehe dazu Bild 5-1). Des Weiteren dient der OPV IC2B bzw. IC3B mit dem dazugehörigen Kondensator C9 bzw. C8 als Tiefpass, damit ein Aufschwingen des Signales unterdrückt wird.



**Bild 5-3: Schaltplan zu Messsystemauswertung**

Der nächste OPV IC4A ist für die Addition der beiden bearbeiteten Sensorsignale zuständig und verstärkt das Gesamtsignal auf den geforderten  $\pm 4V$ -Pegel. Die Gesamtverstärkung ist dabei von -2 bis -42 über das Potentiometer R14 einstellbar. Eine größere Verstärkung macht dabei keinen Sinn, da sonst Störungen zu stark mitverstärkt werden. Die beiden gegeneinander geschalteten Z-Dioden dienen als Schutz für den Schaltkreis. Sie begrenzen das verstärkte Ausgangssignal

auf ca. 12,7 V, da der Schaltkreis ab einer Ausgangsspannung von 15 V zu viel Strom ziehen und überhitzen würde. Der letzte OPV IC4B stellt nochmal einen Tiefpass dar, der ein Aufschwingen des Ausgangssignals  $S_{Ax}$  verhindern soll. Des Weiteren kann bei Bedarf über diesen OPV mittels der Steckbrücke X2 eine Invertierung des Ausgangssignales vorgenommen werden. Dazu muss der Jumper der Brücke gesteckt sein. Ist er nicht gesteckt, findet auch keine Invertierung statt. Die restlichen Kondensatoren dienen der Rauschunterdrückung, damit keine Störsignale über die Betriebsspannungen eingekoppelt werden. Dazu müssen die Kondensatoren möglichst nahe an den Betriebsspannungspins der Schaltkreise verlötet werden. Im Bild 5-4 sind die Bereiche markiert, die zum Messsystemabgleich notwendig sind.



**Bild 5-4: Leiterplattenfoto mit Beschriftung**

### 5.3 Funktionsprüfung

Die Funktionsprüfung beinhaltet eine Prüfung der Betriebsspannungen der einzelnen Schaltkreise, um eventuelle Kurzschlüsse zu erkennen, einen Test der korrekten Funktion der Schutzdioden, einen mit Spannungsquellen simulierten Signaltest und eine Prüfung zur Aufnahme und Ermittlung der Grenzfrequenz. Die Ergebnisse des Messprotokolls sind in den folgenden Tabellen dargestellt.

Sollwert	Istwert Spannungsquelle	IC1	IC2	IC3	IC4	Status
+15 V	+15,02 V	+15,02 V	+15,02 V	+15,02 V	+15,02 V	i. O.
-15 V	-14,99 V	/	-14,99 V	-14,99 V	-14,99 V	i. O.
10 V Ref.	/	10,005V	/	/	/	i. O.

**Tabelle 5-1: Prüfung der Versorgungsspannungen**

Die Werte Offset  $S_1$  und Offset  $S_2$  in Tabelle 5-2 sind die eingestellten Offsetspannungen des jeweiligen Signales vor der Addition mit dem dazugehörigen Signal, während die Werte IC2 Pin 7 und IC3 Pin 7 die Signalspannungen mit addiertem Offset darstellen, welche auch von der Platine zur Einstellung herausgeführt sind (Bild 5-4). In Tabelle 5-2 ist sehr schön zu sehen, dass das Ausgangssignal durch die beiden Z-Dioden begrenzt wird.

Offset $S_1$	Offset $S_2$	IC2 Pin 7	IC3 Pin 7	$S_{Ax}$ bei $V_G = -2$	$S_{Ax}$ bei $V_G = -42$	Status
5,022 V	5,011 V	-5,008 V	-4,995 V	-9,991 V	-12,61 V	i. O.

**Tabelle 5-2: Funktionstest des Übersteuerungsschutzes**

Die in Tabelle 5-3 eingestellten Signalwerte für  $S_1$  und  $S_2$  simulieren eine unterschiedliche Montageposition der Sensoren, womit deutlich wird, dass der Offsetabgleich völlig getrennt voneinander vorgenommen werden kann und somit keinen Nachteil für das Ausgangssignal darstellt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass eine radiale Lageänderung komplett kompensiert und keine Spannungsänderung des Ausgangssignales an den Regler übergeben wird, wodurch es auch zu keiner falsch interpretierten axialen Lageverschiebung kommt.

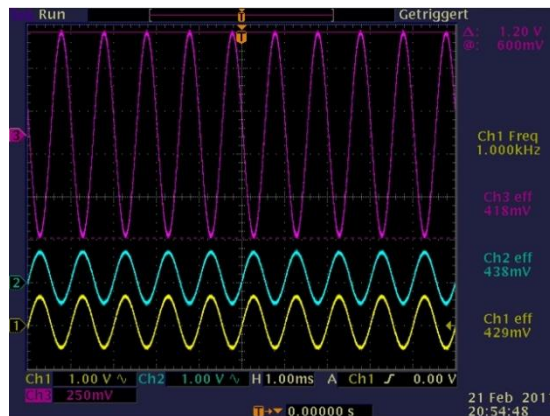
$S_1$	$S_2$	Offset $S_1$	Offset $S_2$	IC2 Pin7	IC3 Pin7	$S_{Ax}$ bei $V_G = -2$	Verschiebung
-11 V	-13,05 V	5,503 V	6,541 V	0 V	0 V	0 V	keine
-12 V	-14,05 V	5,503 V	6,541 V	0,51 V	0,5 V	1 V	axial
-10,02 V	-12,06 V	5,503 V	6,541 V	-0,49 V	-0,49 V	-0,98 V	axial
-10,02 V	-14,05 V	5,503 V	6,541 V	-0,49 V	0,5 V	0 V	radial
-12 V	-12,02 V	5,503 V	6,541 V	0,51 V	-0,51 V	0 V	radial

**Tabelle 5-3: simulierte Funktionsprüfung**

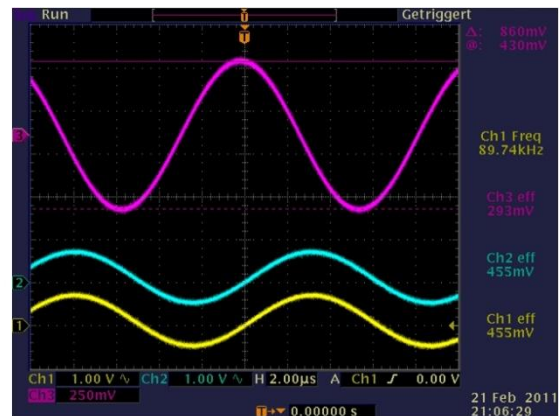
Für die Aufnahme des Frequenzganges wird an beiden Signaleingängen der Messsystemauswertungsplatine mit einem Funktionsgenerator ein sinusförmiges Wechselsignal mit einer Amplitude von 0,6 V und einer Startfrequenz von 1 kHz angelegt (Bild 5-5a, Channel 1 und 2). Diese Kleinsignalaussteuerung simuliert das Schwingen der Welle in axialer Richtung. Dabei beträgt der Spitze-Spitze-Wert des Ausgangssignales 1,2 V (Bild 5-5, Channel 3). Im Folgenden wird nun die Frequenz soweit erhöht bis das Ausgangssignal um -3dB bedämpft wird und somit nur noch einen Spitze-Spitze-Wert von ca. 0,848 V aufweist (Bild 5-5b). Die erhaltene Grenzfrequenz beträgt ca. 90 kHz und ist somit deutlich höher als die Grenzfrequenz der eingesetzten Wirbelstromsensoren mit 20 kHz. Dadurch wird gewährleistet, dass die Sensoren effektiv über ihren kompletten Frequenzgang betrieben werden können.



# Alternative Wirbelstrommesssystemanordnungen zur axialen Lageerfassung einer magnetisch gelagerten Welle



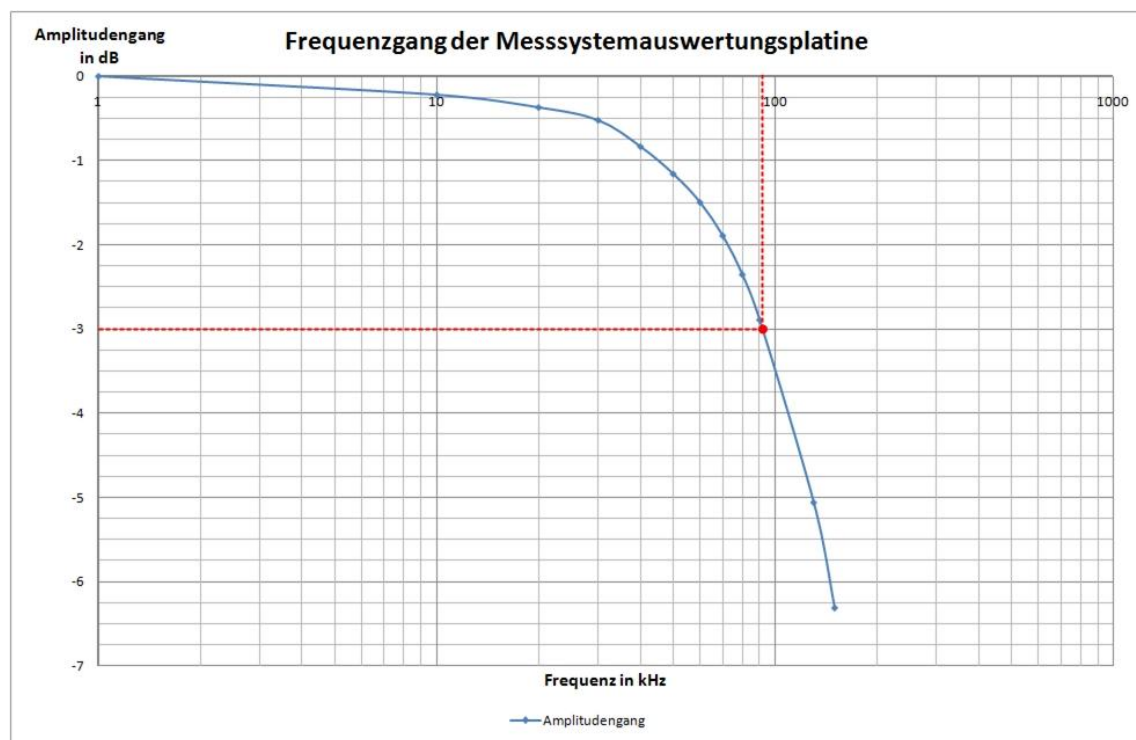
a)



b)

**Bild 5-5: Oszilloskopbilder der a) Start- und b) Grenzfrequenz**

Der vollständige aufgenommene Frequenzgang ist im Bild 5-6 dargestellt.



**Bild 5-6: Frequenzgang der Messsystemauswertungsplatine**

Zum Schluss wird die alternative Messsystemanordnung inklusive der Messsystemauswertungsplatine an einer aktiv magnetgelagerten Welle in offener Bauform einem praktischen Test unterzogen, den sie auch ohne weitere Probleme besteht.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist es eine alternative Messsystemanordnung von Wirbelstromsensoren zu entwickeln, damit die axiale Lageerfassung einer magnetisch gelagerten Welle weiterhin ermöglicht wird, auch wenn die Stirnfläche des Rotors nicht zur Verfügung steht. Dieses Ziel wird in Form einer Anordnung an einem Konus von  $9,5^\circ$  erfolgreich umgesetzt. Der empfohlene Winkel von  $25^\circ$  kann aufgrund der vorgegebenen Konstruktionsbedingungen des Kundenprojektes nicht bei der Modellwelle realisiert werden. Genau dies gilt es bei der Verwendung des alternativen Messsystems zur Planung eines Magnetlagersystems immer zu beachten, den Winkel auch anhand der Konstruktionseinschränkungen auszuwählen. Der Konus sollte immer im Messbereich des zu verwendeten Sensors bleiben, egal bei welcher axialen Lagestellung. Genauso sollte ein dementsprechend passender Wirbelstromsensor gewählt werden. Der damit resultierende Übertragungsfaktor sollte groß genug sein, um mit einer maximalen Verstärkung von 20 pro verwendeten Sensor auszukommen.

Die anderen Sensoranordnungen, wie zum Beispiel die Kante, werden aufgrund der Nichtlinearität des Messsignales verworfen. Besteht allerdings die Möglichkeit, die Kennlinie des Wirbelstromsensors auf diese Anordnung hin anzupassen, zum Beispiel durch den Einsatz eines digitalen Konverters, so stellt auch diese Anordnung eine Möglichkeit zur alternativen Messsystemanordnung dar, wobei dafür weitere dementsprechende Untersuchungen notwendig sind.

Die Genauigkeit eines mit einem Konus verwendeten alternativen Messsystems hängt vom Konuswinkel und von der Genauigkeit bzw. Empfindlichkeit des verwendeten Wirbelstromsensors ab. Der im Bakkalaureat verwendete Sensor hat eine laut Hersteller angegebene Empfindlichkeit von  $4 \text{ mV}/\mu\text{m}$ . Das heißt im Umkehrschluss, dass der Sensor eine minimale Abstandsänderung von einem  $\mu\text{m}$  wahrnimmt und dabei eine Spannungsänderung von  $4 \text{ mV}$  ausgibt. Bei dem verwendeten Konus von  $9,5^\circ$  ergibt sich somit eine Genauigkeit der axialen Lageänderung von maximal  $6 \mu\text{m}$ . Diese Genauigkeit kann mit einem steileren Winkel noch weiter verbessert werden. Die Verwendung eines Winkels von  $>45^\circ$  verbessert sogar die Genauigkeit, als dass sie mit dem Sensor überhaupt möglich

wäre. Solche großen Winkel haben aber auch einen dementsprechenden kleineren Messbereich, wodurch sie nur bei einem demnach speziellen Anwendungsfall in Betracht gezogen werden sollten.

Die in dieser Arbeit verwendete alternative Messsystemanordnung wird mit zwei Wirbelstromsensoren realisiert, welche gegenüberliegend angeordnet werden. Die beiden Sensorsignale werden mittels einer Addition ausgewertet um die radiale Änderung zu kompensieren und ein der axialen Lageänderung proportionales Signal zu erhalten. Diese Auswertung lässt sich auch umkehren. Durch eine Subtraktion der Sensorsignale wird die axiale Änderung kompensiert und somit ein der radialen Lageänderung proportionales Signal erhältlich. Aus dieser Tatsache heraus kann das axiale Messsystem in das Radialmesssystem integriert werden, indem die Messspur konisch ausgeführt wird und die vier Radialsensoren dementsprechend ausgewertet werden. Werden hierfür alle beiden Radiallagerebenen benutzt, erhöht sich zudem noch die Genauigkeit der axialen Messung. Somit lassen sich die zusätzlichen Sensoren des alternativen Messsystems einsparen und auf die herkömmliche Axiallageerfassung bezogen wird der eine Axialsensor eingespart.

## Anhang

Diagramm in voller Größe zu Bild 4-5 im Kapitel 4.2.1 auf Seite 28.

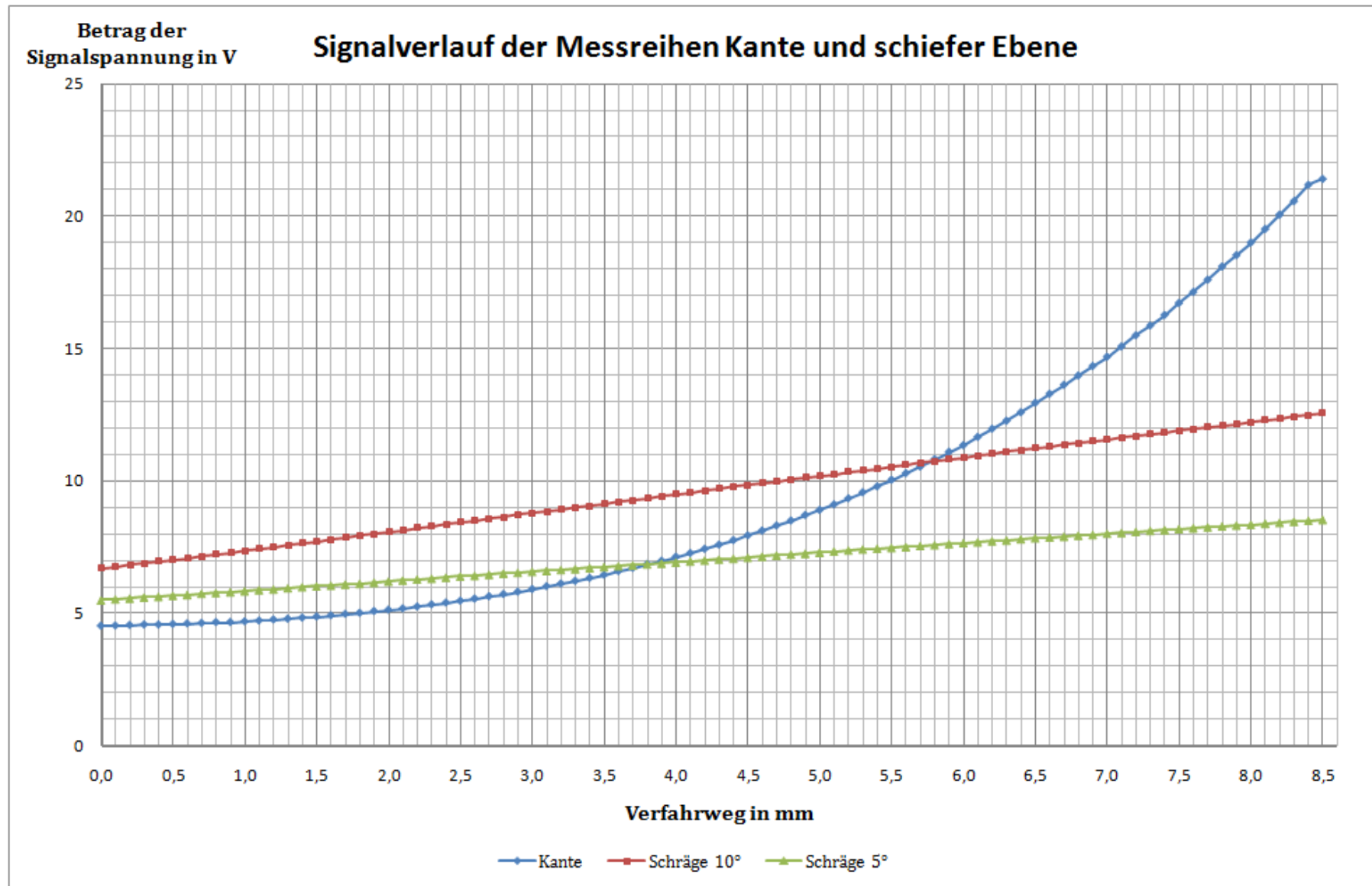


Diagramm in voller Größe zu Bild 4-6 im Kapitel 4.2.1 auf Seite 28.

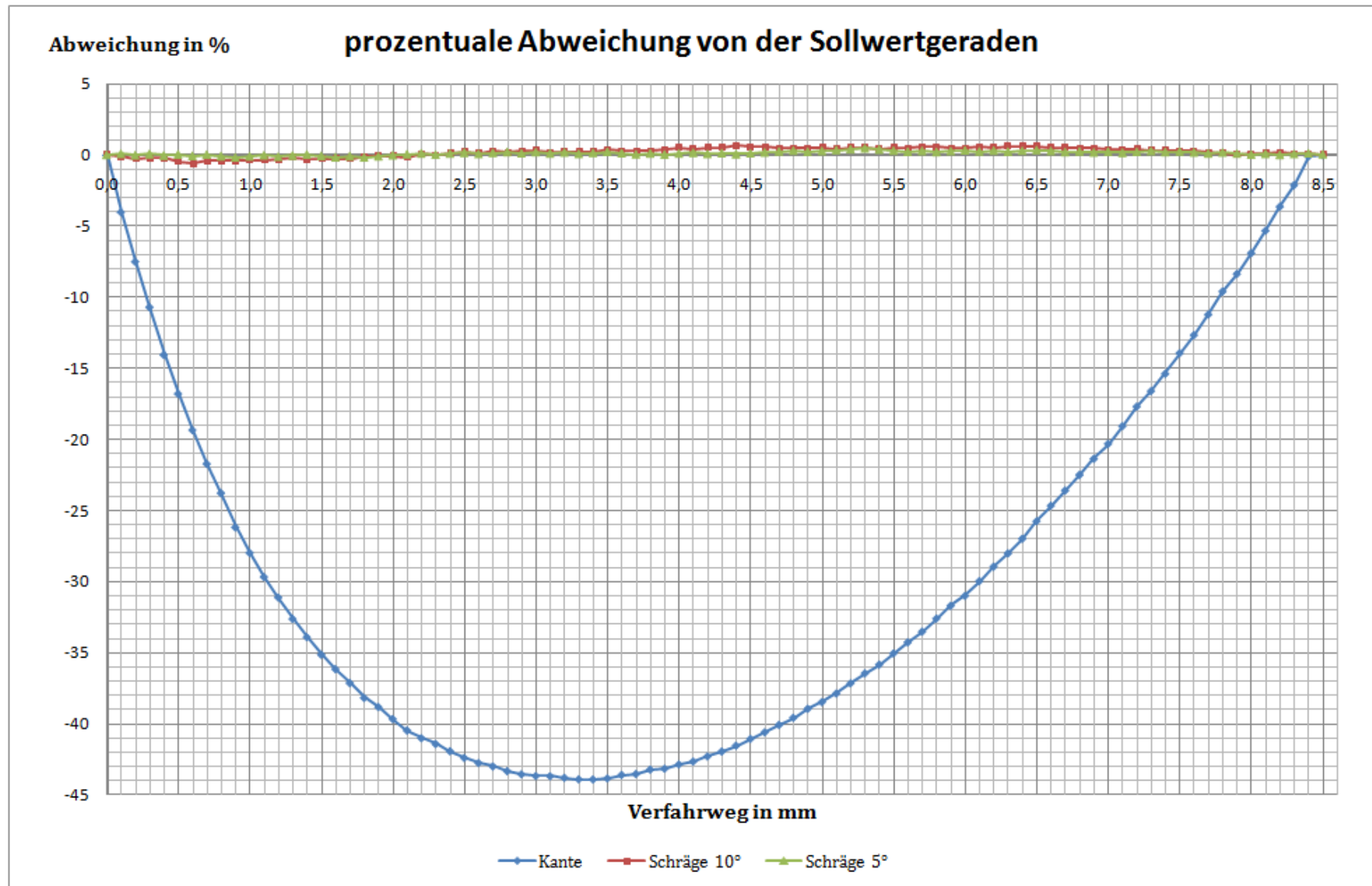


Diagramm in voller Größe zu Bild 4-7 im Kapitel 4.2.2 auf Seite 30.

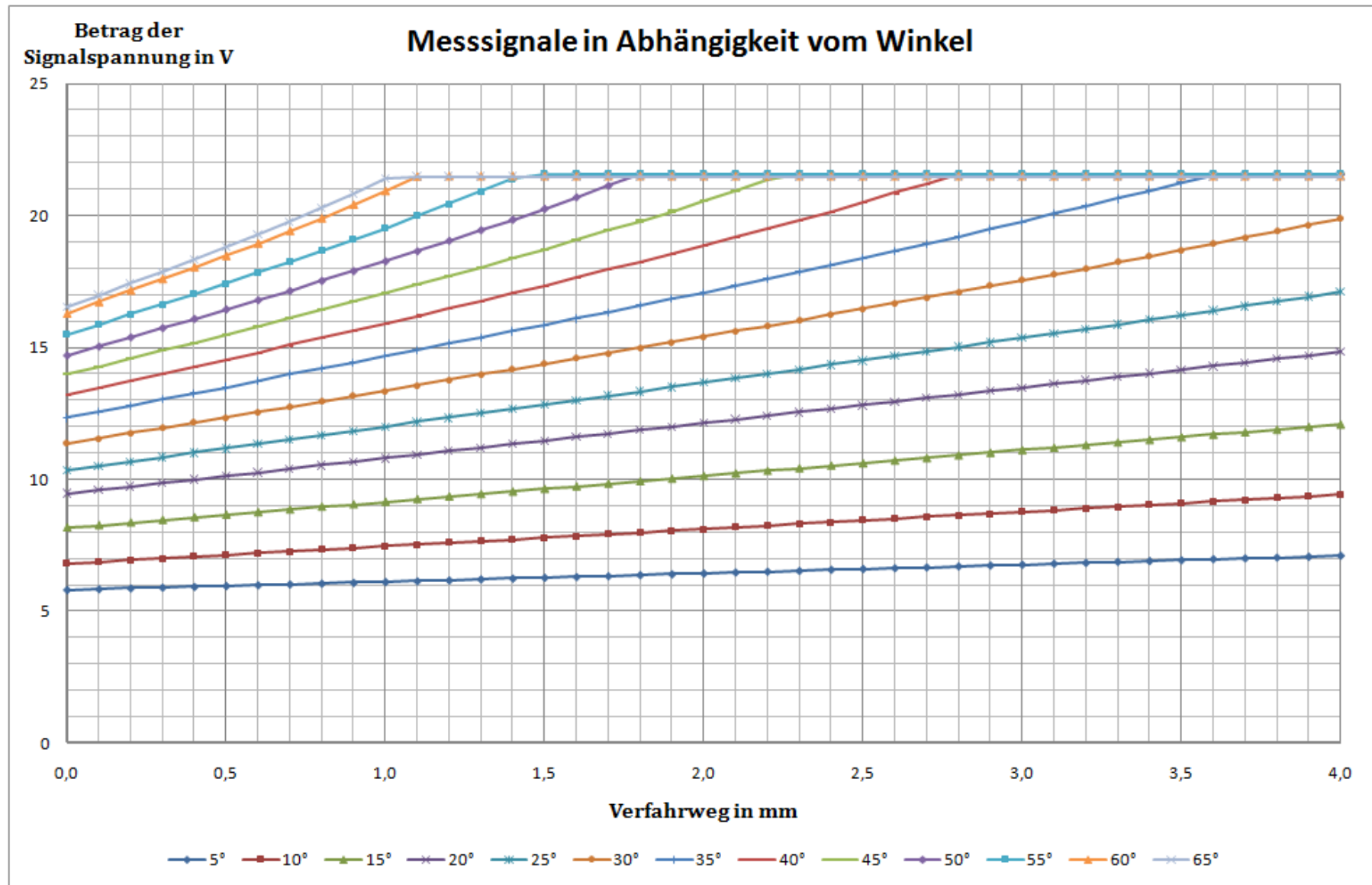


Diagramm in voller Größe zu Bild 4-8 im Kapitel 4.2.2 auf Seite 30.

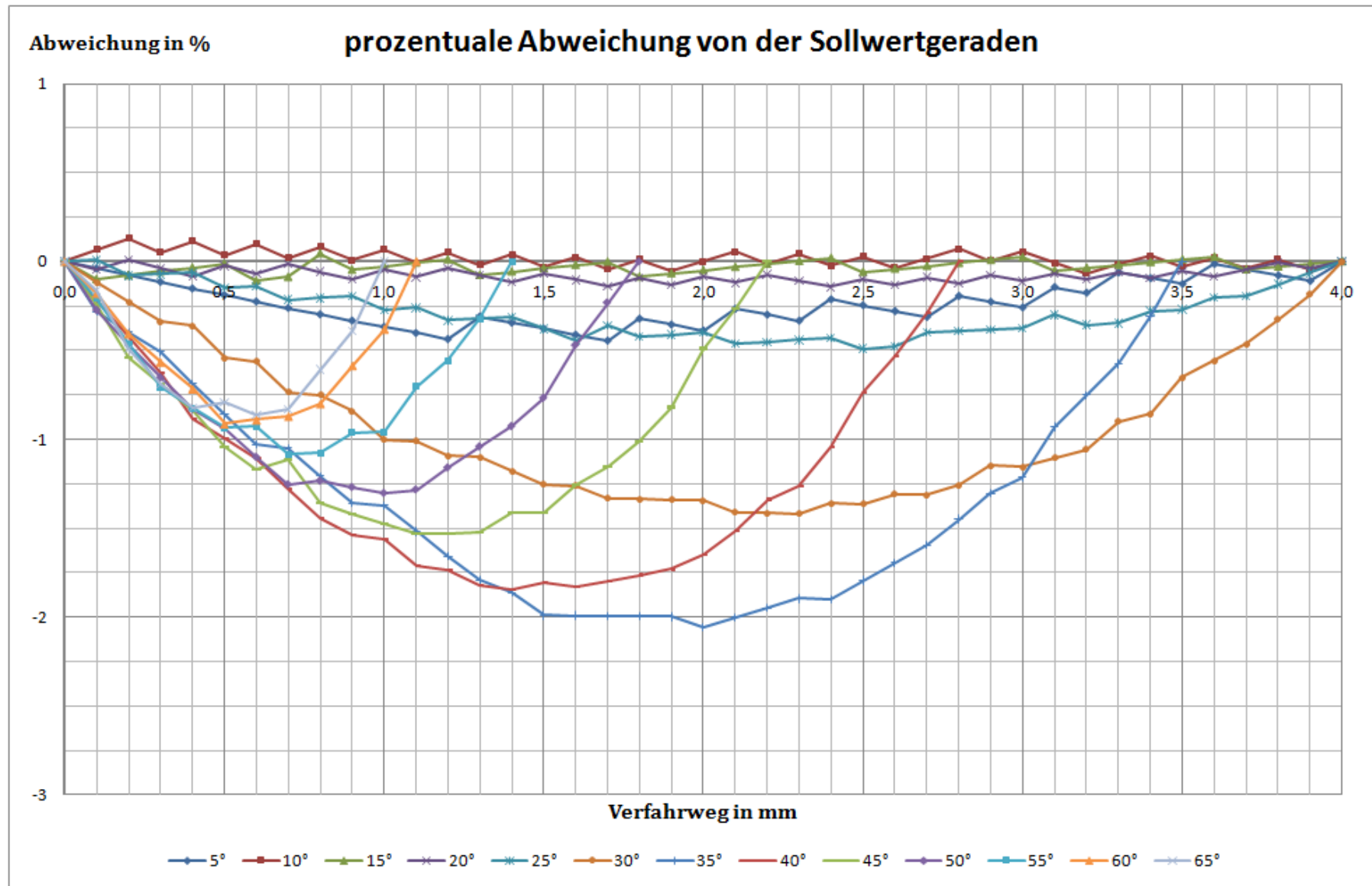




Diagramm in voller Größe zu Bild 4-9 im Kapitel 4.2.3 auf Seite 32.

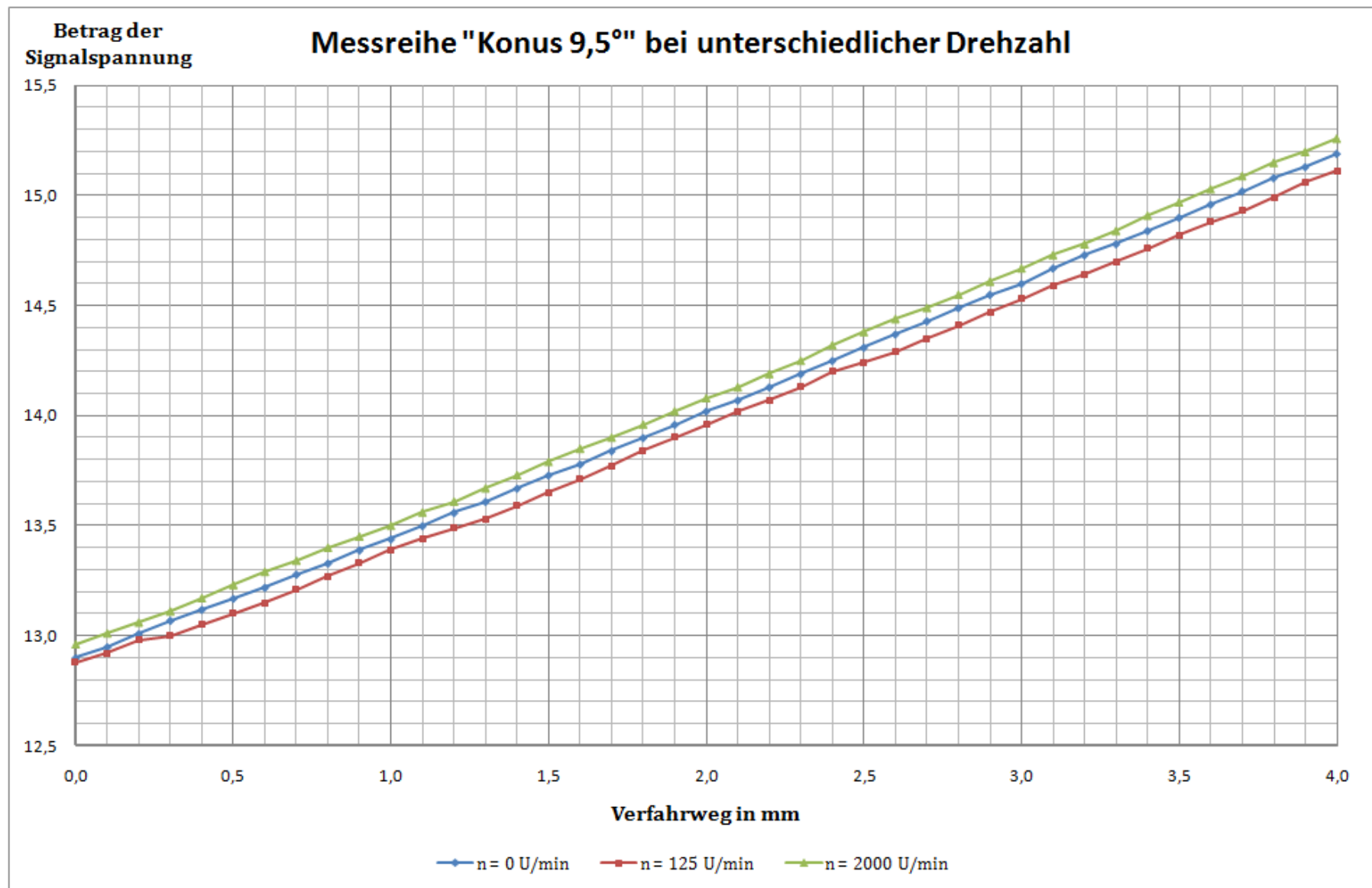
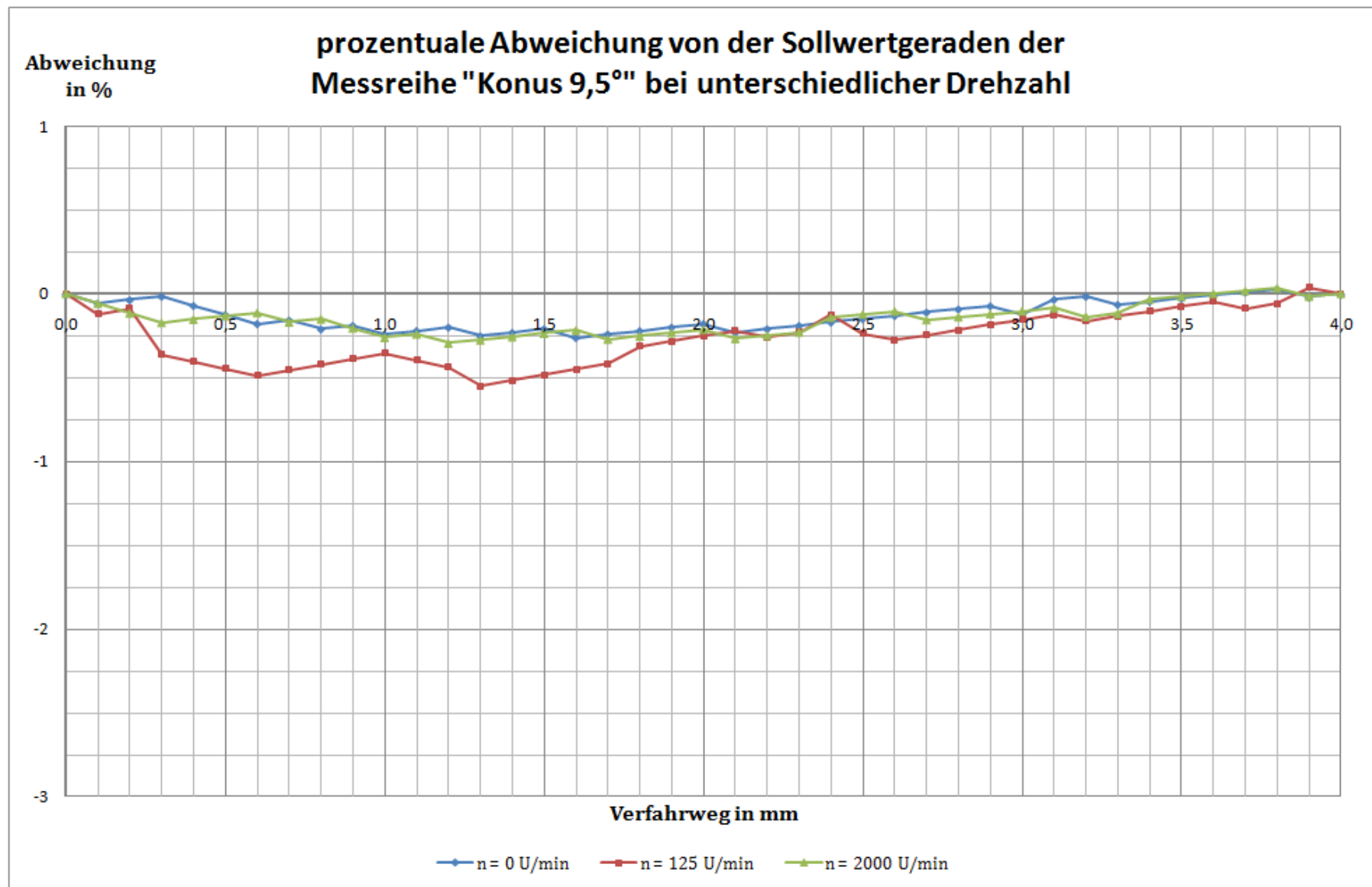
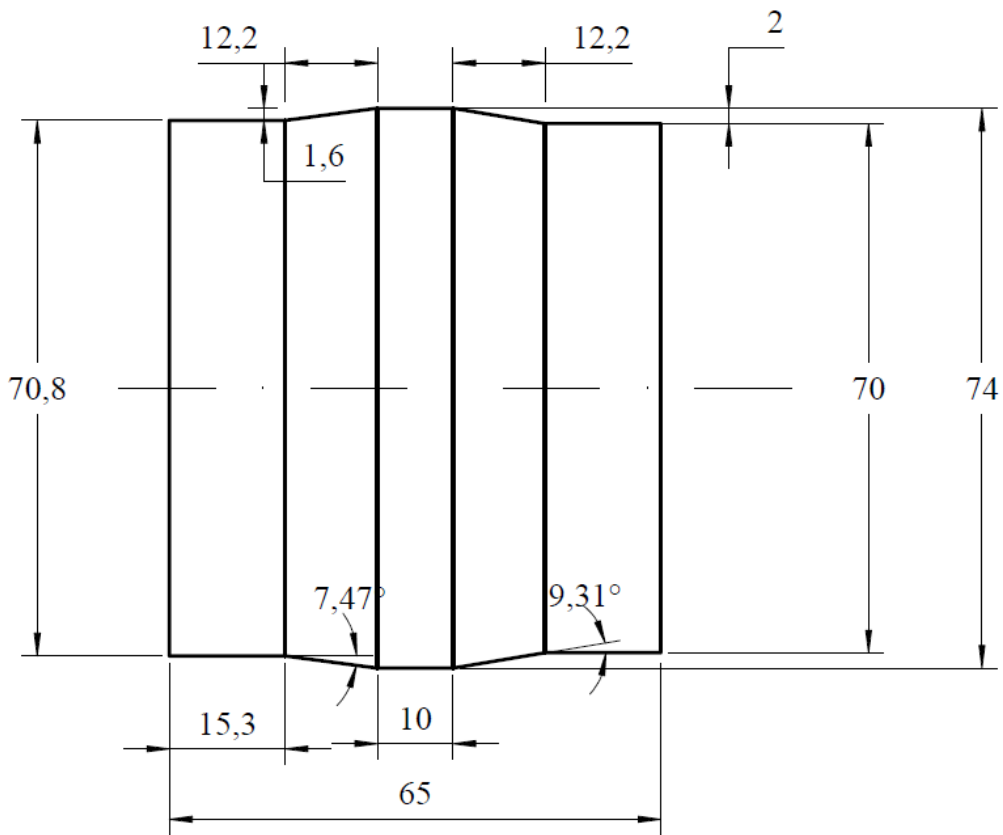
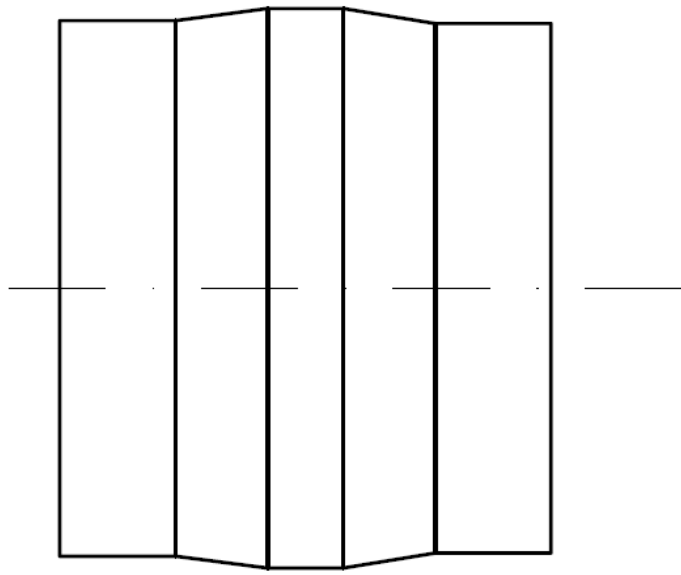


Diagramm in voller Größe zu Bild 4-10 im Kapitel 4.2.3 auf Seite 33.





EAAT GmbH Chemnitz  
 Annaberger Str. 231  
 09120 Chemnitz  
 Tel.: 0371 5301912  
 Fax.: 0371 5301913  
 E-Mail: [eaatgmbh@t-online.de](mailto:eaatgmbh@t-online.de)  
 Internet: [www.eaat.de](http://www.eaat.de)

# Modellwelle Konus

TITEL



Bearbeiter: M. Löwe

GROSSE  
**A4**

DATUM  
 21.10.2010

NR

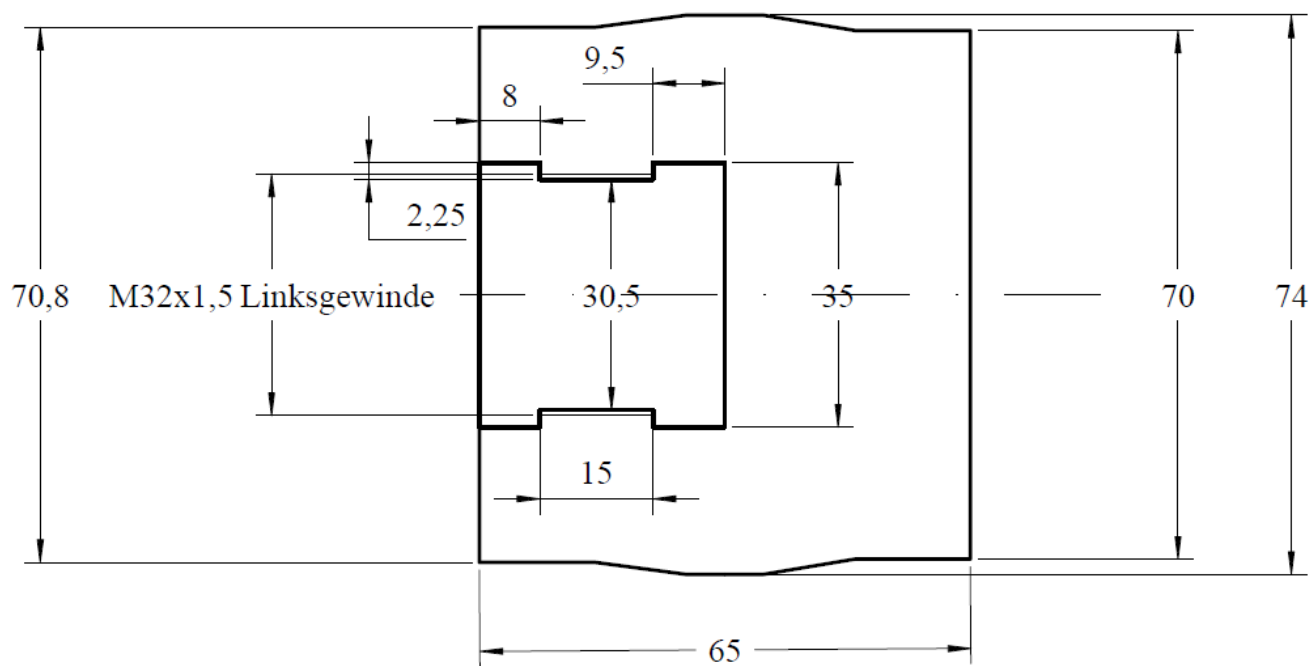
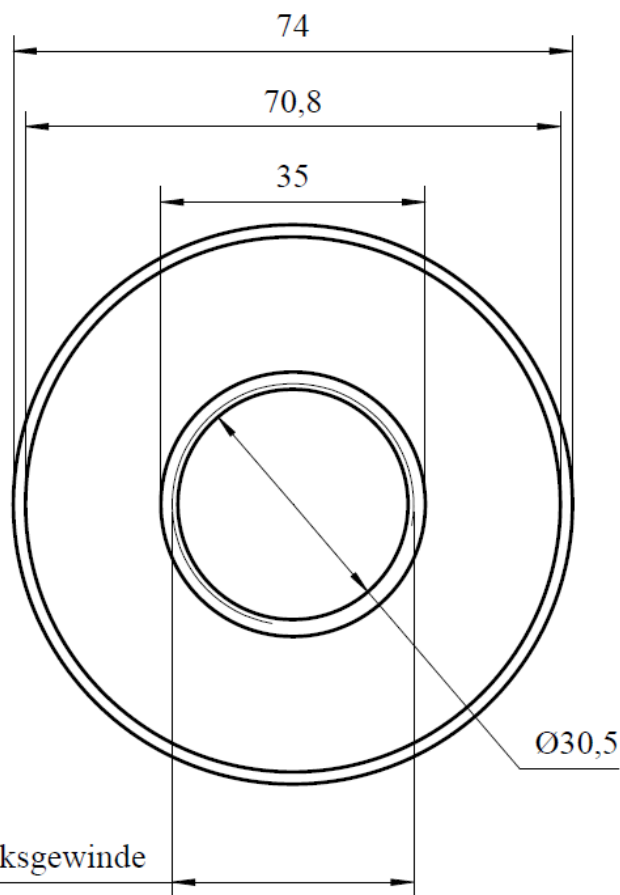
IGP

MAßSTAB

1:1

BLATT

1 von 1



EAAT GmbH Chemnitz  
Annaberger Str. 231  
09120 Chemnitz  
Tel.: 0371 5301912  
Fax.: 0371 5301913  
E-Mail: eaatgmbh@t-online.de  
Internet: www.eaat.de

Modellwelle "Konus"  
mit M32x1,5 Linksgewinde

TITEL

**EAAT**

Bearbeiter: M. Löwe

GRÖSSE

A4

DATUM

11.02.2011

NR

IGEP

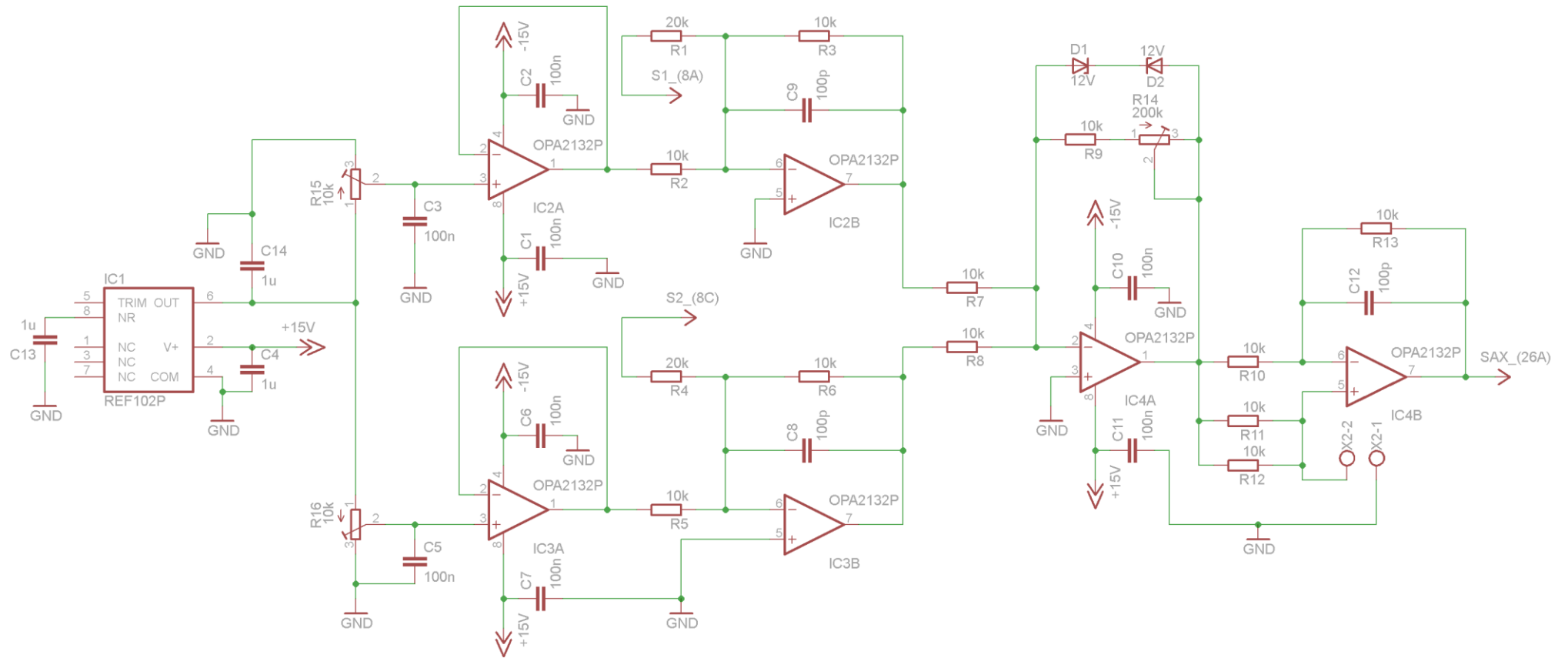
MAßSTAB

1:1

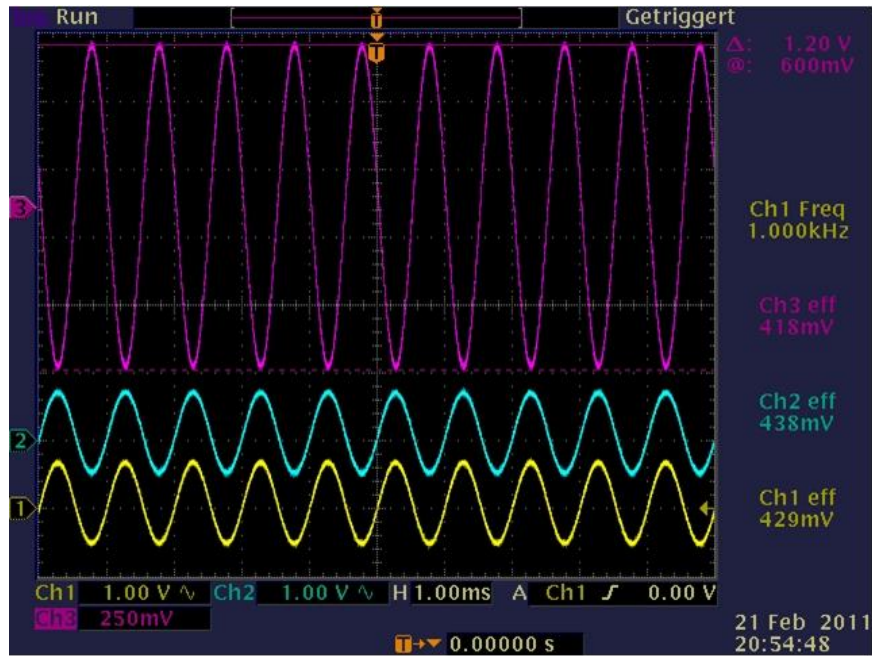
BLATT

1 von 1

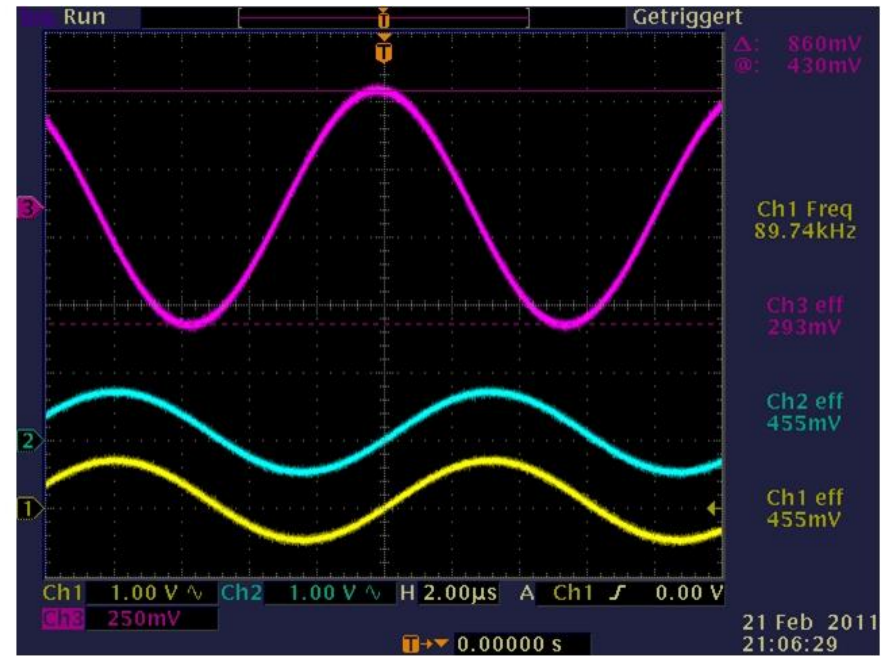
Der Schaltplan in voller Größe zu Bild 5-3 im Kapitel 5.2 auf Seite 40.



Das Bild 5-5 im Kapitel 5.3 auf Seite 44 in vergrößerter Darstellung.

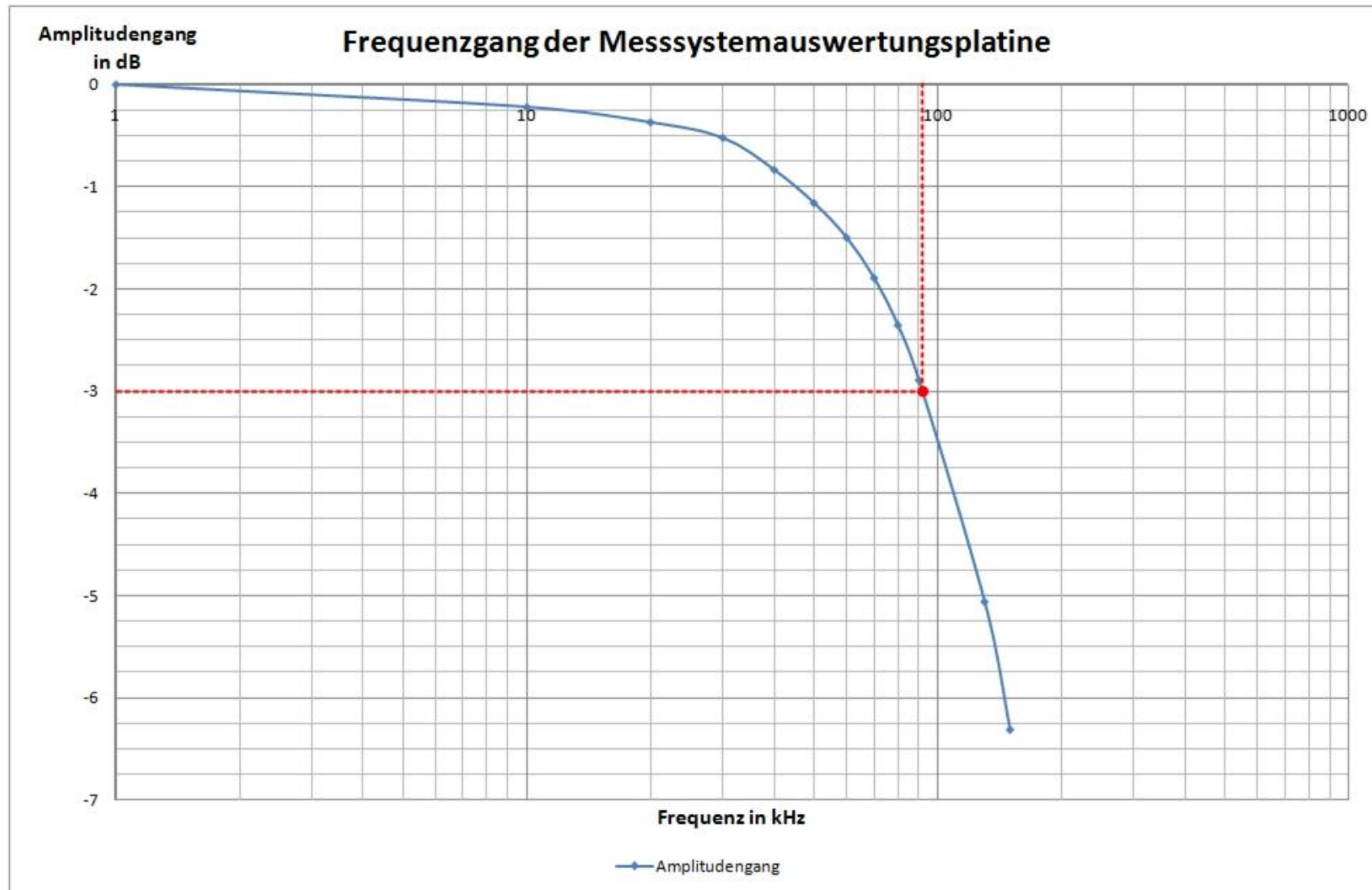


a)



b)

Das Diagramm in voller Größe zu Bild 5-6 im Kapitel 5.3 auf Seite 44.



## Literaturverzeichnis

- [1] EAAT GmbH Chemnitz: Magnetische Lager. Aufbau, Wirkungsweise und Einsatzerfahrungen. – 2007. – 95 S.  
Chemnitz, Firmenschrift, 2007
- [2] Schnell, Gerhard: Sensoren in der Automatisierungstechnik. – Braunschweig: Vieweg, 1991
- [3] Schiessle, Edmund: Sensortechnik und Messwertaufnahme. – 1. Auflage Würzburg: Vogel, 1992
- [4] Lehner, Günther: Elektromagnetische Feldtheorie für Ingenieure und Physiker. – Berlin: Springer, 1990
- [5] Paul, Reinhold: Elektrotechnik 1. Felder und einfache Stromkreise. – 3. Auflage Berlin: Springer, 1993
- [6] Parthier, Rainer: Messtechnik. Grundlagen für alle technischen Fachrichtungen und Wirtschaftsingenieure. – 1. Auflage Braunschweig: Vieweg, 2001
- [7] Die Bibliothek der Technik: Lineare Weg- und Abstandssensoren. Berührungslose Messsysteme für den industriellen Einsatz.  
– München: sv corporate media, 2004
- [8] WayCon GmbH: Fachbericht Wirbelstromsensor: URL:  
<http://waycon.wordpress.com/2006/11/24/fachbericht-wirbelstromsensor/>, 24.  
November 2006



## **Selbständigkeitserklärung**

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Chemnitz, 10.04.2011

---

Marco Löwe